

第2章 鋼橋の点検・モニタリング技術の現状と課題

2-1. 橋梁管理機関別の点検

鋼橋に対する点検・モニタリング技術の方向性を探る上で、現在行われている点検業務の実態を知ることが有益である。実際に行われている点検の頻度、手法、実施体制などは、各管理機関の長年の経験に基づいて定められたものであり、また、現在までのところ、損傷の早期発見といった目的は達成しているものと考えられる。しかし、それぞれの点検レベルにおいて課題や改良の余地がないわけではなく、点検要領の中には、例えば「構造物の特性に応じて点検に適用されている赤外線カメラやトンネル覆工表面計測技術等の非破壊検査技術については、その用途、技術仕様、精度ならびに個々の構造物の損傷状況、使用条件、環境条件等を十分理解し、利用目的に適合する場合には積極的に導入を図ることとする。（NEXCO 保全点検要領：構造物編）」、「近年、レーザ点検車、赤外線点検車、ビデオ点検車、高所点検車、附属施設振動計測システムなどを初めとして各種点検計測機器が開発されており、より確実な点検を実施するため最新機種を導入を積極的に検討するのが望ましいが、その際、点検精度、点検効率、経済性等を十分に勘案し、効率的点検が行えるよう配慮すべきである。」（首都高速道路 構造物等点検要領）といった記述があり、点検・モニタリングに関する新技術への期待が記されている。実際の点検業務においてどのような課題があるのか、また、点検・モニタリング新技術がそれにどのように関わられるかを明らかにするために、まず、各管理機関の点検要領をもとに、どのような点検業務が行われているのかについてまとめる。

2-1-1. 点検の種別

各管理機関とも概ね日常点検（通常点検）、定期点検、臨時点検、初期点検の区分を設けている点では共通しているが、詳細な点検の呼称や、その細分方法は管理機関によって異なっている。点検手法、頻度などにより、概ね以下のように分類することができる。具体的な頻度や手法については後に詳細に示す。

- ・巡回車による点検 巡回車からの目視や車上感覚により行う点検。いずれの機関でも実施しており、その頻度も高い。

- ・徒歩巡回、遠望目視による点検 橋下などから遠望目視によって行う点検。頻度は数年に1回程度となっているところが多い。管理機関によってこの点検を日常点検として位置づけているところと、定期点検としているところがある。

- ・近接点検 構造物の各部位に接近し、目視や、必要に応じて検査機器を用いて行う点検。5年程度に1回実施するとしているところが多い。すべての管理機関において、この点検は定期点検の一つとして分類されている。

・臨時点検 地震や異常気象時など必要の都度行う点検

2-1-2. 点検の詳細

a) 巡回車による点検

路面巡回による点検はいずれの機関でも比較的高い頻度で実施している。交通量に応じて点検頻度を変えているところもある。路面上からの点検のうち、鋼橋に関する点検項目は、異常たわみ、異常音、異常振動、異常遊間、交差道路からの漏水などである。広範囲を短時間に点検できる反面、点検の手法は主に車上月視や車上感覚であり、構造物に関する詳細な情報を取得することは難しい。

b) 徒歩巡回、遠望目視による点検

橋下や検査路からの点検では、前記項目の他、疲労き裂、部材破断やゆるみ、塗膜の状態、腐食の状態などが点検項目として加わる。点検手法は主として目視である。路上からは確認できない箇所も点検することができるが、橋梁全体にわたって目視点検を行うためにはある程度の時間を要する。また、橋下や点検路から見える構造物の部位は限られているため、必ずしも橋梁の隅々まで点検を行えるわけではない。ある管理機関の実績では、1人あたり平均して1日約1kmの区間の点検が行われているとのことである。ただしこれは橋梁本体の他、下部工、付属物なども含めて行われている点検の点検効率である。

c) 近接点検

点検頻度は各管理機関で異なっており、1回/年から1回/10年までのばらつきがある。点検手法は主に近接目視であるが、必要に応じて検査機器を使用して点検を行う。

実際の点検業務で使用されている機器の例として次のようなものが上げられている。

ひびわれ計測用機器：コンタクトゲージ、クラックゲージ、アイゲージ、隙間ゲージ

ひびわれ検出用機器：浸透探傷装置、超音波探傷装置、磁粉探傷装置、渦流探傷装置

変位・沈下量計測用機器：レベル、トランシット、傾斜計

高力ボルト点検機器：トルクレンチ、超音波探傷器

一例として、首都高速道路(株)の「構造物等点検要領」(平成18年度版)、NEXCOの「保全点検要領 構造物編」(平成18年4月)に記載されている内容についてまとめて示す。実際の点検としてどのようなことが行われているかを知る上で参考になる。

表.2-1-1 首都高速道路(株) 構造物等点検要領(平成18年度版)

| 点検種別 | | 点検名 | 概要 | 頻度 |
|------|-----------|---------------|------------------------------|-------------------------------------|
| 日常点検 | 巡回点検(I) | 高速道路上巡回点検(昼間) | 車上月視または車上感覚による高速道路上昼間点検 | 3/Wまたは2/W(路線ごとに設定) |
| | 巡回点検(II) | 高架下巡回点検 | 車上月視による高架下点検 | 1/M |
| | 巡回点検(III) | 雨天時巡回点検 | 車上月視による高架下雨天時点検 | 適宜 |
| 定期点検 | 徒歩点検(I) | 高速道路上徒歩点検 | 徒歩目視による高速道路上点検 | 1/5Y |
| | 徒歩点検(II) | 高架下徒歩点検 | 徒歩目視による高架下点検 | 2/Y (第3者被害想定箇所) 1/2Y(上記以外) |
| | 接近点検(I) | 構造物接近点検 | 接近目視による構造物点検(必要に応じ点検機器併用) | 原則 1/5Y |
| | 接近点検(II) | 土木付属施設接近点検 | 接近目視による土木付属施設点検(必要に応じ点検機器併用) | 原則 1/5Y 1/3Y(大型標識柱) 1/2M(非常口) |
| | 機器点検(I) | 舗装機器点検 | 車載機器による舗装点検 | 1/Y |
| | 機器点検(II) | その他機器点検 | 機器測定による点検 | 適宜 |
| | 初回点検 | 初回点検(構造物点検) | 接近点検(I)に準じる | 供用開始1年後 |
| | 追跡点検(I) | 損傷箇所追跡点検 | 損傷の経年変化の追跡点検 | 適宜(最大5年継続) |
| | 追跡点検(II) | 新工法追跡点検 | 新工法採用箇所の経年変化の追跡点検 | 適宜(最大5年継続) |
| | 追跡点検(III) | モニタリング点検 | 代表的構造物の経年変化の追跡点検 | 適宜 |
| 臨時点検 | 臨時点検(I) | 異常時点検 | 地震/暴風雨などの異常事態発生時点検 | 異常事態発生時 |
| | 臨時点検(II) | 事故発生時点検 | 事故発生時の類似箇所点検 | 事故発生時 |
| | 臨時点検(III) | 特別点検 | 必要に応じ特別に行う点検 | 適宜 |

表. 2-1-2 NEXCO 保全点検要領 構造物編 (平成 18 年 4 月)

| 点検種別 | | 概要 | 頻度 |
|------|----------------|---|-------------------------------------|
| 初期点検 | | 近接目視による点検 | 供用開始前 |
| 日常点検 | 安全点検 | 主に車上目視, 車上感覚により本線内から点検. 必要に応じて降車. | 4/2W~7/2W (交通量ごとに設定) |
| | 変状診断点検 経過観察 | 構造物の変状の比較的短期的な進行状況を把握するために, 本線内車上目視, 降車による遠望目視, 近接目視により行う点検 | 適宜 |
| | 変状診断点検 簡易診断 | 構造物の変状の比較的中長期的な進行状況を把握するために, 遠望目視, 近接目視, 打音などにより行う点検 | 適宜 |
| 定期点検 | 定期点検 A | 本線外から遠望目視を主体に行う点検 | 1/Y |
| | 定期点検 B | 損傷メカニズムが比較的複雑でない構造物を対象として, 構造物の健全性を把握するために, 近接目視・打音等により詳細な診断を行う点検 | 1/5Y (第 3 者影響箇所) 1/10Y (上記以外) |
| 詳細点検 | | 損傷メカニズムが比較的複雑な構造物を対象として, 構造物の健全性を把握するために, 近接目視・打音等により詳細な診断を行う点検 | 1/5Y (第 3 者影響箇所) 1/10Y (上記以外) |
| 臨時点検 | | 日常点検の補完や異常気象時等に, 必要に応じて行う点検 | 適宜 |

2-2. 鋼橋の点検・モニタリングに関するニーズ

鋼橋の大多数は国土交通省, 地方自治体, 道路公社などの公的機関, JR を始めとする鉄道会社, 民営化された高速道路会社などが建設, 管理を行っている。日本経済の高度成長期に建設された大量の鋼橋は供用開始から 30~50 年を経過し, きめ細かな維持管理を求められる時期に入り, 点検の重要性が増している。

鋼橋の点検・モニタリングに関するニーズを管理者の視点から整理すると, 供用開始から長期間が経過した大量の鋼橋を今後も安全に供用するため, 適切な品質の点検を低コストで実施することが基本である。点検に求められる品質としては, 損傷を見逃さないこと, 損傷の位置, 大きさ, ささまざまな性状を必要な精度で検出すること, 損傷が構造物, 利用者, 第三者の安全性に与える影響を適切に評価, 判定することなどがあげられる。コストに関しては, 一部の地方自治体などでは橋梁の維持管理に十分な費用を確保できない状況にあること, 公共事業全般に対するコスト縮減の要請から, 点検の頻度や手法の見直し, 新技術, 新システムの導入によるコスト縮減が試みられている。橋梁の点検が交差施設の供用に影響を与える場合は, 作業時間, 工程の短縮が求められる。

現場における鋼橋の点検業務は, 目視や打音検査など, 労働集約的な作業が中心である。その作業環境は危険な高所作業, 粉塵や鳩の糞などによる劣悪な環境, 狭隘な部位における無理な作業姿勢など, いわゆる代表的な 3K 職場であり, 点検員の立場からは作業環境の改善が望まれる。

2-2-1. 品質

鋼橋の維持管理において, 点検を二つに分けて考える場合がある。一つは, 管理の対象となる構造物の損傷, 劣化, 機能の低下, もしくはその予兆を広く把握するために行うもの, 他方は, 発見された損傷に対し, 原因の究明, 補修補強の必要性の判定, 補修補強方法の検討を行うため, 対象を絞り込み詳細な調査を行うもので, 狭い意味では前者を点検, 後者を調査と呼び, 広い意味では両者を合わせて点検と呼ぶことが多い。

点検の目的, 求められる品質は, 構造物の損傷, 劣化, 機能の低下, その予兆をもれなく把握すること, 損傷の程度を評価し, 対策の必要性及び緊急性を一定の程度の精度で判定することにある。一方, 調査の目的, 求められる品質は, 点検で発見された損傷に対し, 原因の究明, 補修補強の必要性の判定, 補修補強方法の検討を行うため, 必要な精度で損傷の性状を明らかにすることにあると考えられる。

・アクセス困難な構造物、検出困難な損傷

近年では橋梁の維持管理に配慮し, 点検通路や点検梯子を設けることが多いが, 既設の橋梁の中には点検を行うための十分な設備がなくアクセスが困難な事例もある。また, デッキプレートとトラフリブの溶接部内面側に発生する疲労損傷のように, 一般的な目視点検では発見困難な損傷も報告されている。管理者が損傷をもれなく把握するためには, 全ての構造物に対し容易なアクセスを確保すること, 予見される損傷を確実に検出する手法を開発することが求められる。

・損傷の客観的評価

損傷を適切に評価することは, 損傷をもれなく発見することとともに, 点検に求められる重要な品質の一つである。近年, 橋梁の維持管理を合理的に行うため, 管理者がアセットマネジメントあるいはブリッジマネジメントと呼ばれる手法を導入する事例が多く, 点検結果をもとに橋梁の損傷の程度を客観的に評価, 数値化する試みが行われている。

・社会構造の変化への対応

高度成長期に建設された構造物の高齢化が進み, 維持管理が今後一層重要になるのに対し, 団塊の世代のリタイアにより熟練技術者の減少が予想される。したがって, 点検の品質を確保するためには, 経験の浅い点検員でも一定の精度で損傷を検出, 評価できるように支援する検査機器, システムなどの開発が求められる。

2-2-2. コスト

目視点検の手順は, 足場等の設置, 現場へのアクセス, 目視点検の実施及び記録, 点検結果の評価及び判定, という流れが一般的であり, これらの各段階においてコスト縮減に繋がる技術の開発が望まれる。

遠望目視または接近目視で行われる狭い意味の点検については、映像をデジタル化する技術の応用が期待されるが、目視点検の対象は、塗装の劣化、腐食、亀裂、変形、ボルト等の脱落、RC床版の損傷（コンクリートの剥離、ひびわれ、遊離石灰、鉄筋の腐食、他）、添架されている付属物の損傷など多岐にわたること、鋼橋は様々な部材から構成され死角が存在すること、既往の事例から想定することのできない未知の損傷を如何にして検出するかなど、熟練した点検員による目視点検と同等の品質、効率で実施するには課題が多いと思われる。

しかし、例えば、点検の対象を疲労亀裂の検出に絞れば、既往の研究により、構造詳細、応力性状によりどの部位にどのような亀裂が発生するかが概ね明らかにされている。疲労亀裂の発生、進展が特に懸念される橋梁に対しては、亀裂の発生が予想される部位にセンサーを設置すれば、点検員が現場に行くことなく、常時モニタリングすることも可能と考えられる。

調査では、機器を用いて何らかの非破壊検査、応力測定などを行うのが一般的であり、コストは、人件費、試験及び計測機器の費用、足場の費用からなる。未知の損傷までも対象としなければならない狭い意味の点検に比べると、対象を絞り込むことができる調査の方が技術開発の余地は大きいと思われる。

参考のため、高速道路6社の土木構造物点検費を公表されている資料に基づき表.2-2-1にまとめた。各社の事情（建設地点の条件、構造物の比率、損傷の進行状況など）により、延長当りの費用には大きな差が現れている。

表.2-2-1 高速道路6社の土木構造物点検費

| 会社名 | 供用延長 (km) | 土工延長 (km) | 橋梁延長 (km) | TN延長 (km) | 平成17年度下半期の 土木構造物点検費 (税抜・億円) |
|----------------------------|--------------|--------------|--------------|--------------|-----------------------------------|
| 東日本高速道路 ²⁻¹⁾ | 3,348 | 2,668 | 406 | 273 | 14 |
| 中日本高速道路 ²⁻²⁾ | 1,687 | 1,208 | 345 | 134 | 7 |
| 西日本高速道路 ²⁻³⁾ | 3,255 | 2,287 | 557 | 411 | 14 |
| 首都高速道路 ²⁻⁴⁾ | 283 | 15 | 233 | 35 | 21 |
| 阪神高速道路 ²⁻⁵⁾ | 234 | 20 | 201 | 13 | 14 |
| 本州四国連絡高速道路 ²⁻⁶⁾ | 173 | 98 | 75 | | 1 |

2-2-3. 工程

鉄道や幹線道路と交差する橋梁では、鉄道の場合はき電停止時間内、道路の場合は交通量が少なくなる深夜、限られた時間内に点検、調査を行なうことが求められる。例えば、首都高速道路を規制して作業する場合、最も条件の厳しい路線では午前1時から午前5時までの間に作業を行わなければならない。交通規制帯の設置撤去に要する時間を考慮すると、点検を実施できる作業時間は2~3時間である。作業時間の短縮は、大量の鋼橋を効率的に点検するためにも重要なニーズである。

2-2-4. 作業環境

鋼橋の点検の現場は、点検員にとって作業環境が良いとは言えないのが現状である。施工性の向上、作業環境の改善は現場で作業する点検員のニーズであるとともに、管理者にとってもコスト縮減、工程短縮につながるニーズと言える。

・軽快な移動

接近目視点検は昇降階段、点検通路、足場上などを移動しながら行うが、高さや幅が不十分な場合があり、さらに横桁、対傾構、ダイヤフラム、斜材などがあるため、効率的な移動は難しいのが一般的である。非破壊検査を行うため、電動工具、検査機器、発電機を携行する場合、移動は一層重労働である。

・汚れ、粉塵、滞水の対策

飯桁の下フランジ上などに堆積した汚れや粉塵は作業環境と作業効率を悪化させる。特に箱桁内部などに鳩が侵入すると、汚れが著しく進行する。また、橋脚内や箱桁内部では事前に滞水の排除が必要な場合もあり、場合によっては酸欠対策が必要になる。

2-2-6. 新技術が求められる具体的な事例

a) 密閉部、狭隘部の点検

点検に求められる品質の一つは損傷を漏れなく把握することであるが、密閉された空間に発生する損傷を一般的な目視点検で見出すのは不可能である。しかし、密閉された空間から発生し、鋼橋の安全性、供用性に危険を与える損傷の存在が指摘されており、その点検手法の開発は重要である。一例として、鋼床版のデッキプレートとトラフリブの溶接部のルートから発生し、デッキプレートを貫通する方向に進展する疲労亀裂が挙げられる。この亀裂は、路面の陥没にいたる可能性のある危険な損傷であり、近年注目されている。しかし、トラフリブにより密閉された内部から発生するため、トラフリブ外面から行う接近目視点検により見出すことはできない。熟練した技術者が超音波探傷試験を行えば、ある程度以上進展した疲労亀裂は検出可能であるが、対象となる橋梁数と溶接線延長を考えると、亀裂を効率的に検出する新技術の開発が望まれる（図.2-2-1）。

また、密閉部以外にも狭隘で接近目視が困難な箇所があり、点検手法の開発が望まれる(図. 2-2-2).

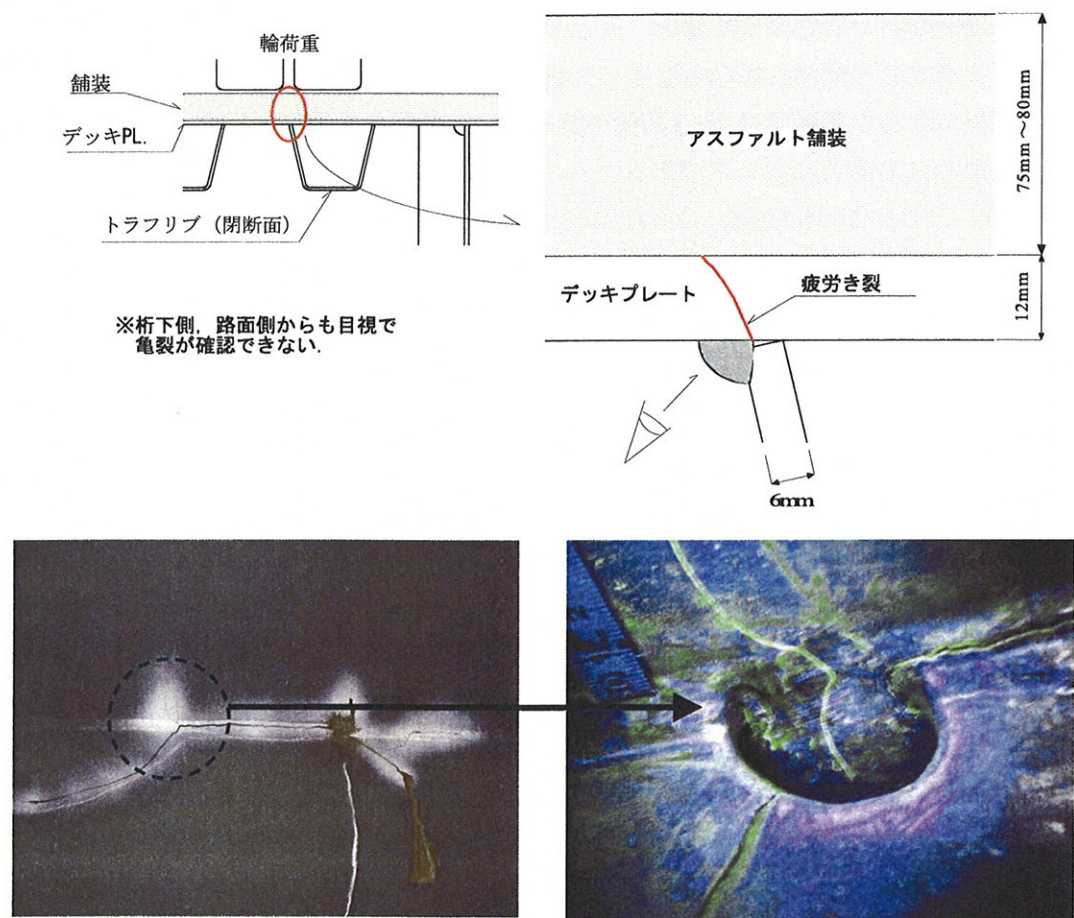


図. 2-2-1 デッキプレートとトラフリブの溶接ビードを破断する疲労亀裂に調査孔を設け、密閉部に進展した亀裂を検出した事例

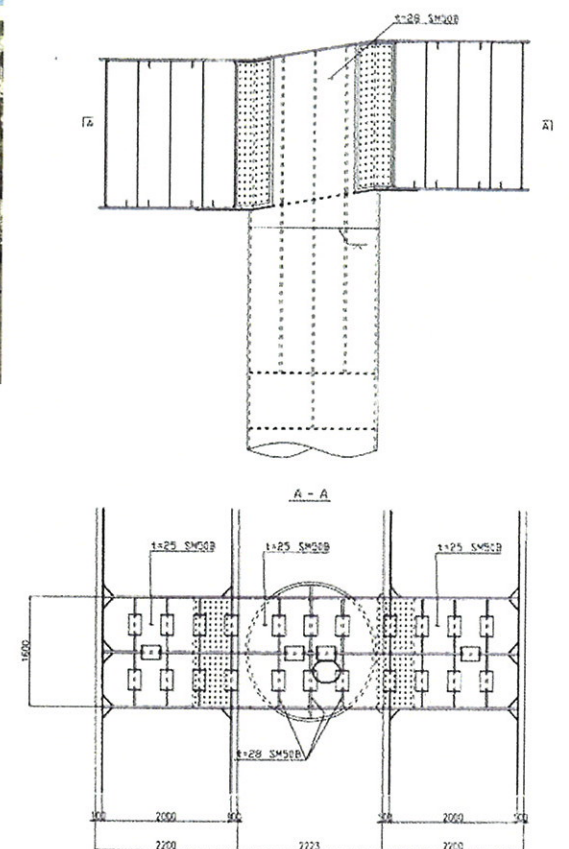


図. 2-2-2 ダイヤフラム等が密に配置され、内部の点検がしづらい鋼製橋脚

b) 溶接部に内在する不溶着，亀裂の検出

首都高速道路などの鋼製橋脚隅角部に疲労亀裂が発見されたが，隅角部端部の複雑な板組みにより 3 溶接線交差部の溶け込みが不完全になりやすいことが原因の一つとして指摘されている。隅角部に内在する不完全溶け込み部の位置，大きさを明らかにすることは補修補強方法を検討する上で重要であるが，従来の超音波探傷試験では，板組みにより不完全溶け込み部の検出が難しい場合もある。また，超音波探傷試験は熟練した技術者が行わないと信頼性の高い結果が得られないこと，記録性の点で問題があることから，新しい検査技術の開発が望まれる（図. 2-2-3）。

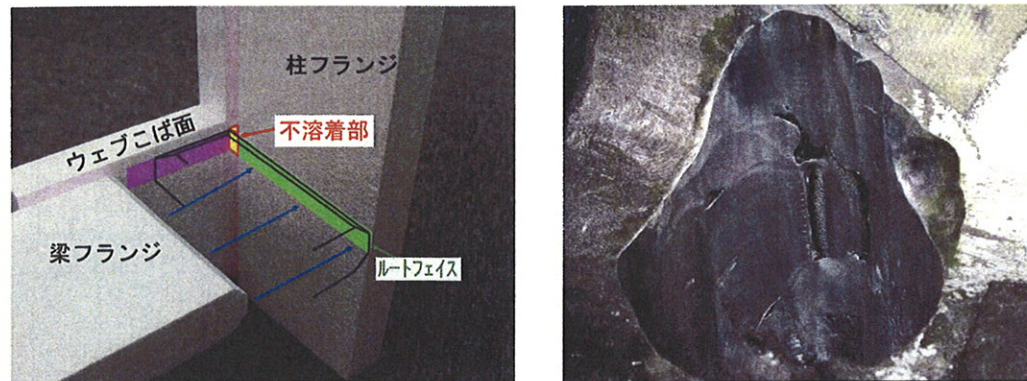


図. 2-2-3 鋼製橋脚隅角部 3 溶接線交差部の不完全溶け込み部

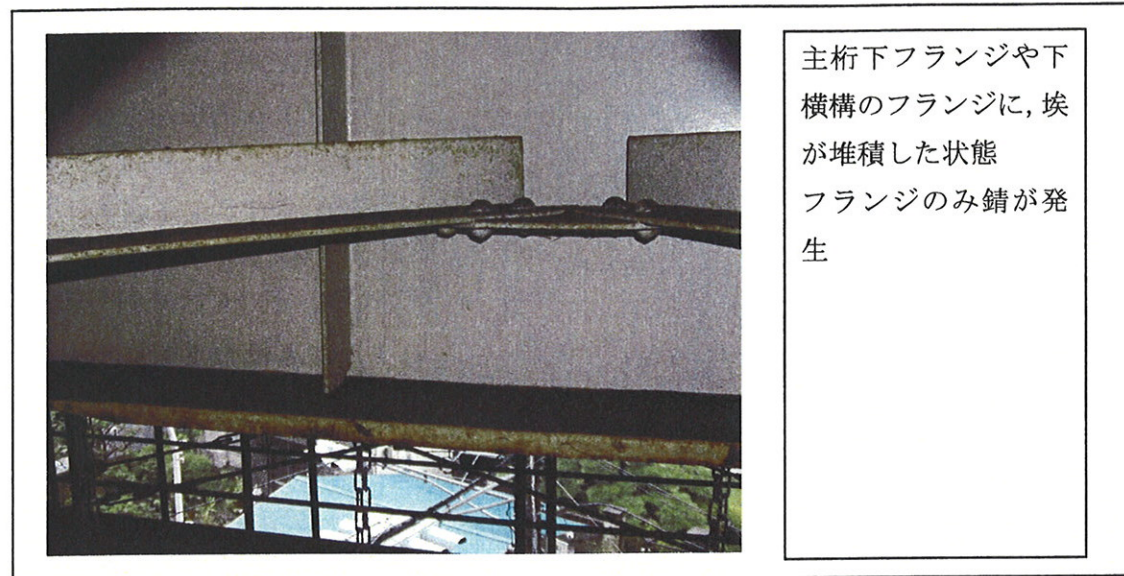
c) 桁端部

鋼橋の桁は，建設時に架設を考え橋脚や橋台幅より内側に設置される。通常の定期点検は，本線外からの遠望目視が基本であり，橋脚の陰となるため損傷の発見が難しい（表. 2-2-2 参照）。ただし，桁端部に発生する損傷は桁端からの漏水がほとんどであるため，漏水を感じし，通電を必要としないモニタリング技術があると良いと考えられる。

表. 2-2-2 桁端部の損傷状況

| | |
|--|--|
| | <p>ジョイントからの漏水による桁端部の腐食損傷（凍結防止剤により腐食が促進されている）</p> <p>日常点検や定期点検では発見しにくい。</p> |
| | <p>桁内面の腐食状況 内面の方が凍結防止剤の残留が多く腐食が進行している。</p> |
| | <p>ガセット取付け部の損傷状況 こちらも凍結防止剤の残留により腐食が進行。</p> |

表. 2-2-3 埃等の堆積による塗膜の劣化



d) 塗装の劣化

鋼橋の防食方法の一つに塗装があり、塗装の劣化の進行状況を判断して塗替えを行い、桁を健全な状態に保つように維持管理を行っている。この場合も上項と同様に定期点検では遠望目視で状態を判断している。しかしながら、劣化状況は表. 2-2-3 のように鋼部材の上側に埃等が堆積することにより、より促進されることとなる。従ってこれらの埃等の堆積の有無や堆積量が測定できるモニタリング技術があると良いと考えられる。

e) 箱桁内の結露

箱桁内の塗装による防食は、紫外線劣化が少ないため変性エポキシ樹脂塗装を行っており、桁外面の塗装と比べると十分な耐久性が確保されている。しかしながら、外気温の温度差や雨上がり等の湿度が高い場合には、表. 2-2-4 にあるような結露が発生し、腐食が促進される場合がある。また、ボルト添接部は凹凸があり水分がたまりやすいことと膜厚管理が難しいため、腐食がより促進される。また桁内の状況は、結露の発生し易い時期に詳細点検にて確認する必要があるが、実際に確認することは難しい。従って、結露発生状況の確認のためのモニタリング技術があると良いと考えられる。

表. 2-2-4 箱桁内の腐食状況



f) アクセス

河川上の橋梁や都市部の高架橋などでは、足場がないと橋梁各部へのアクセスが出来ない場合がほとんどである。地震後の緊急点検では主に桁端部や支承周りに着目した点検が実施されるが、足場や高所作業車がないと桁端部や支承周りすらアクセス、目視ができない橋梁も多い(表.2-2-5の事例1, 事例2)。また、選定された構造形式によっては物理的にアクセスが困難という場合もある(事例3)。地震による損傷のほか、腐食などの問題が生じやすい桁端部や支承周りについては、足場や高所作業車を用いずにアクセス可能な設備を設けることが望ましい。将来的には、アクセスすることなしに状況を確認できる点検装置の開発が望まれる。

跨線橋や跨道橋では、桁下空間の関係から足場の設置が不可能な場合もある。また、検査路が設けられても、検査路の腐食が進行しており移動時に危険を感じる事例もあることから、作業者にとっては検査路自体の維持管理も重要な項目である。

近接目視点検では、桁下から高所作業車を用いて点検する場合も多いが、高架橋の下が交差点や交通量の多い幹線道路の場合は車線規制が困難であり、車からのビデオ撮影を繰り返しての点検が実施される場合がある(表.2-2-6の事例4, 5)。多大な労力を要しており、簡便な点検装置の開発が望まれる。桁下が駐輪場などとして使用されている場合も高所作業車の使用は困難となる(事例6)。

接近できたとしても、物理的な条件により構造物を点検できない場合もある。表.2-2-7の事例7は箱桁内に設置されたケーブルラックが障害となり桁端にアクセスできない場合、事例8, 9は伸縮装置周りの構造が狭隘であるため内部の詳細な点検が出来ない場合、表.2-2-8の事例10は橋脚上に変位制限装置があり、支承の目視点検がしにくい場合である。この他、後から設置された落橋防止装置や裏面吸音板が障害となり桁内へのアクセスが困難となる場合もある。裏面吸音板の中に入る時に、高所作業車を使用しなければマンホールに入れない場合もある。マンホールの位置によっては下の街路を2車線以上規制しなければならない(事例11)。

点検用の昇降階段やマンホール等が少なく、点検通路や桁内を数百m移動しなければならない場合も多い。作業側からの立場からは、各橋脚あるいはその近傍に進入箇所があることが最良であるが、せめて100m毎に設置されることが望まれる。点検では、MT機器一式(発動発電機・延長ケーブル含む)を手作業で移動させる必要があるため、多大な労力を要する。計画時に供用後の維持管理を考慮した構造とするのはもちろんであるが、既に存在する数多くのアクセス困難である部位の点検を容易にする点検装置(例えば点検ロボット)の開発が望まれる。

桁端の維持管理を考慮した構造としては、例えば表.2-2-8の事例12に示すように、桁端部に切欠が設けてあれば、脚付点検通路がなくとも主桁間を行き来することが容易であり、効率的な点検が可能となる。

g) 作業環境

橋脚上や箱桁内は、鳩の死骸や、糞の堆積により汚れている場合が多い(表.2-2-9の事例13, 14, 15)。特に、箱桁内に鳩が侵入した場合は著しく汚れる。事例13は箱桁内に鳩が侵入し、鳩の糞が数十cm堆積した例である。箱桁内に鳩の侵入を許さない設備が必要である。マンホールに扉をつけることは当然のこと、ケーブルラックを桁内へ引き込む位置や、比較的大きなスカラップなど、鳥の侵入が可能な隙間も塞ぐ必要がある。また、鳩が侵入、汚れてしまった場合について、簡易な清掃方法があると良い。

床版点検における写真撮影、スケッチを行なう際に、格間毎に上向きの作業となるため、首が痛くなる(表.2-2-10の事例16)。また、マンホールの設置位置や構造が適切でないため、マンホールの開閉、点検員の出入りが困難な事例も見られる(事例17)。また、塗装足場を使うことも多く、格間毎に中断足場があり、一度に格間全体を撮影できない場合があるが、そのような場合においても簡易な撮影、診断方法があると良い。

その他、橋脚内や箱桁内部では滞水の排除が必要な場合もあり(事例18)、特に橋脚内では酸欠対策が必要となる場合もある。

表. 2-2-5 現場環境の事例：近接目視（その1）



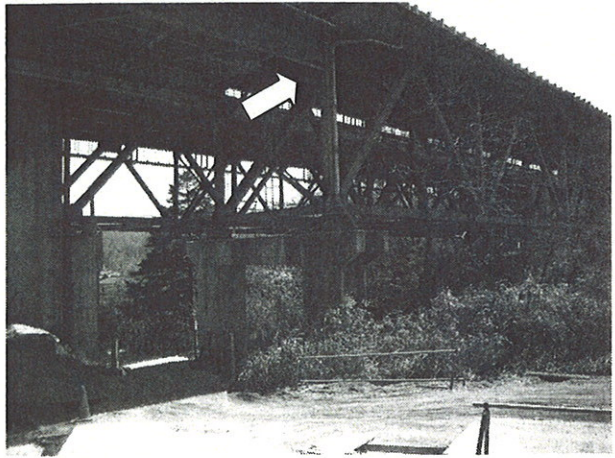
| | |
|---|---|
| <p>事例 1</p>  | <p>点検通路がなく、橋脚上に降りるハシゴもないため、足場を設置しない限り橋脚上の支承周りに接近できない。</p> |
| <p>事例 2</p>  | <p>高架下が運河で点検通路や橋脚上に接近する設備もなく、足場を設置しない限り橋脚上に接近できない。</p> |
| <p>事例 3</p>  | <p>トラス形式の桁に対して、隣の鈹桁がゲルバー形式で支持されている。高さがある為に近づいての支承点検が困難。</p> |

表. 2-2-6 現場環境の事例：近接目視（その2）



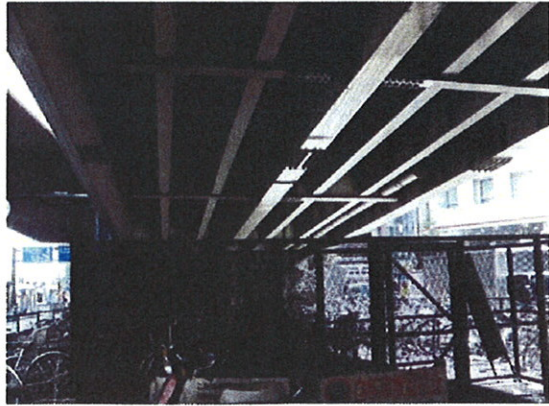
| | |
|---|---|
| <p>事例 4</p>  | <p>高架下の街路の交通量が多く、規制が難しいため、橋脚の点検が困難。</p> |
| <p>事例 5</p>  | <p>交差点上は道路規制ができないため、代替案として走行車からビデオ撮影による点検を実施している。</p> |
| <p>事例 6</p>  | <p>高架下の駐輪場のために、高所作業車を使った床版、鋼桁の点検が困難。</p> |

表. 2-2-7 現場環境の事例：近接目視（その3）



| | |
|---|--|
| <p>事例 7</p>  | <p>ダイヤフラムのマンホールがケーブルラックで塞がれており、桁端側へ行くことが出来ない。</p> |
| <p>事例 8</p>  | <p>伸縮装置サポートビームの支点付近に手や顔が入らないため、サポートビーム受け点の状況を確認できない。</p> |
| <p>事例 9</p>  | <p>桁端の伸縮装置部が狭隘であるため、目視点検が難しい。</p> |

表. 2-2-8 現場環境の事例：近接目視（その4）

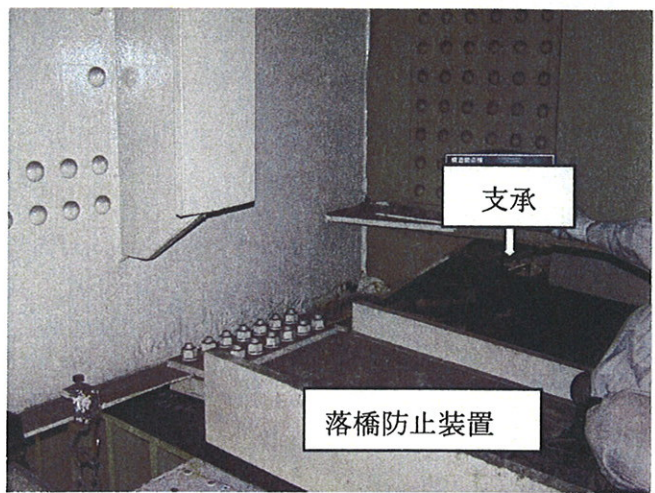
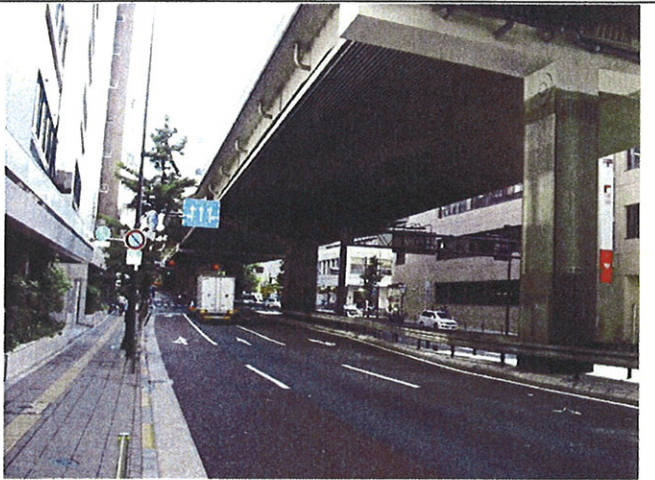

| | |
|--|---|
| <p>事例 10</p>  <p style="text-align: center;">支承</p> <p style="text-align: center;">落橋防止装置</p> | <p>橋脚上に落橋防止装置を追加したため、桁端の目視点検および橋脚上の移動が困難。</p> |
| <p>事例 11</p>  | <p>裏面吸音板内に入るのに車線規制が必要である。マンホールの位置によっては2車線の規制が必要となる。</p> |
| <p>事例 12</p>  | <p>桁端に大きな切欠があるため、橋脚上での行き来が容易にできる。</p> |

表. 2-2-9 現場環境の事例：近接目視（その5）


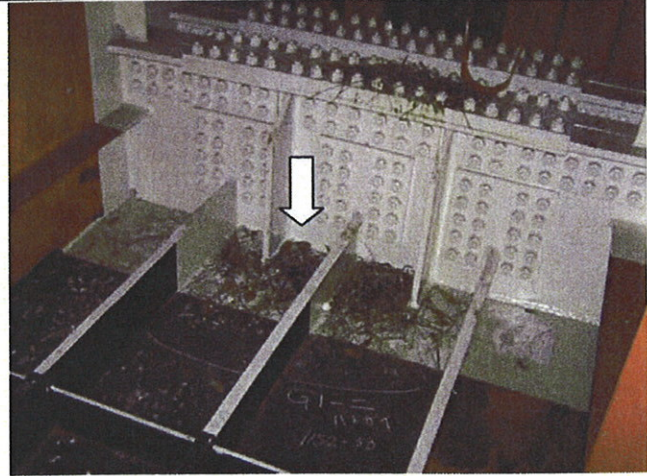
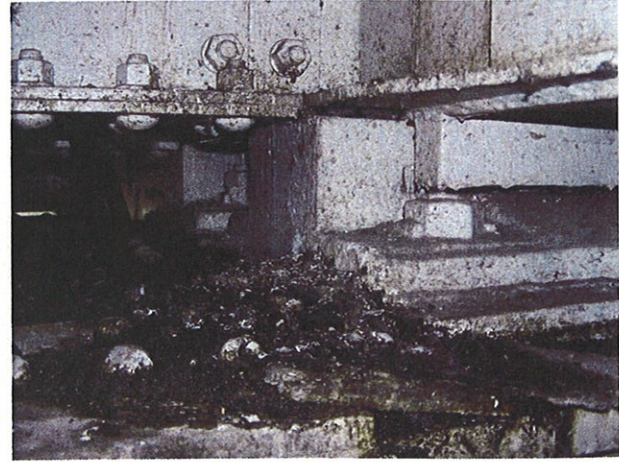



| | | |
|-------|---|-----------------------------------|
| 事例 13 |  | <p>箱桁内に鳩が侵入したため、箱桁内が著しく汚れている。</p> |
| 事例 14 |  | <p>鳩害。 鳩の死骸あり。</p> |
| 事例 15 |  | <p>支承の周りが鳩の糞で覆われており、点検が困難。</p> |

表. 2-2-10 現場環境の事例：近接目視（その6）

| | | |
|-------|---|---|
| 事例 16 |  | <p>床版の点検では終始上向きの姿勢となり、首が痛くなる。またこの場合、桁高が高いため接近目視に脚立が必要となる。</p> |
| 事例 17 |  | <p>マンホールの位置で桁と下部工の隙間が狭く、出入りが困難な上、マンホールの開口にボルトをはずす必要がある。</p> |
| 事例 18 |  | <p>桁端が滞水しており、点検が困難。</p> |

h) 塗膜の除去

鋼橋の溶接部の詳細点検には、磁粉探傷試験、超音波探傷試験が一般的に用いられるが、これらの検査の実施にあたっては塗膜の除去が必要となる。溶接部の塗膜除去作業は多大な労力を要する上、点検終了後には塗膜撤去部の再塗装が必要となり、かなりの作業量となる。表.2-2-11と表.2-2-12は実橋の塗膜割れと溶接割れの例であるが、塗膜を除去しない状態では塗膜割れと溶接割れの判断が難しい場合も多い。塗膜を除去することなしに、溶接部、溶接内部の検査が可能となる機器の開発が望まれる。渦流探傷試験がその手法の一つであると考えられるが、その精度や記録性に課題もあり、実用化に向けたさらなる開発が望まれる。

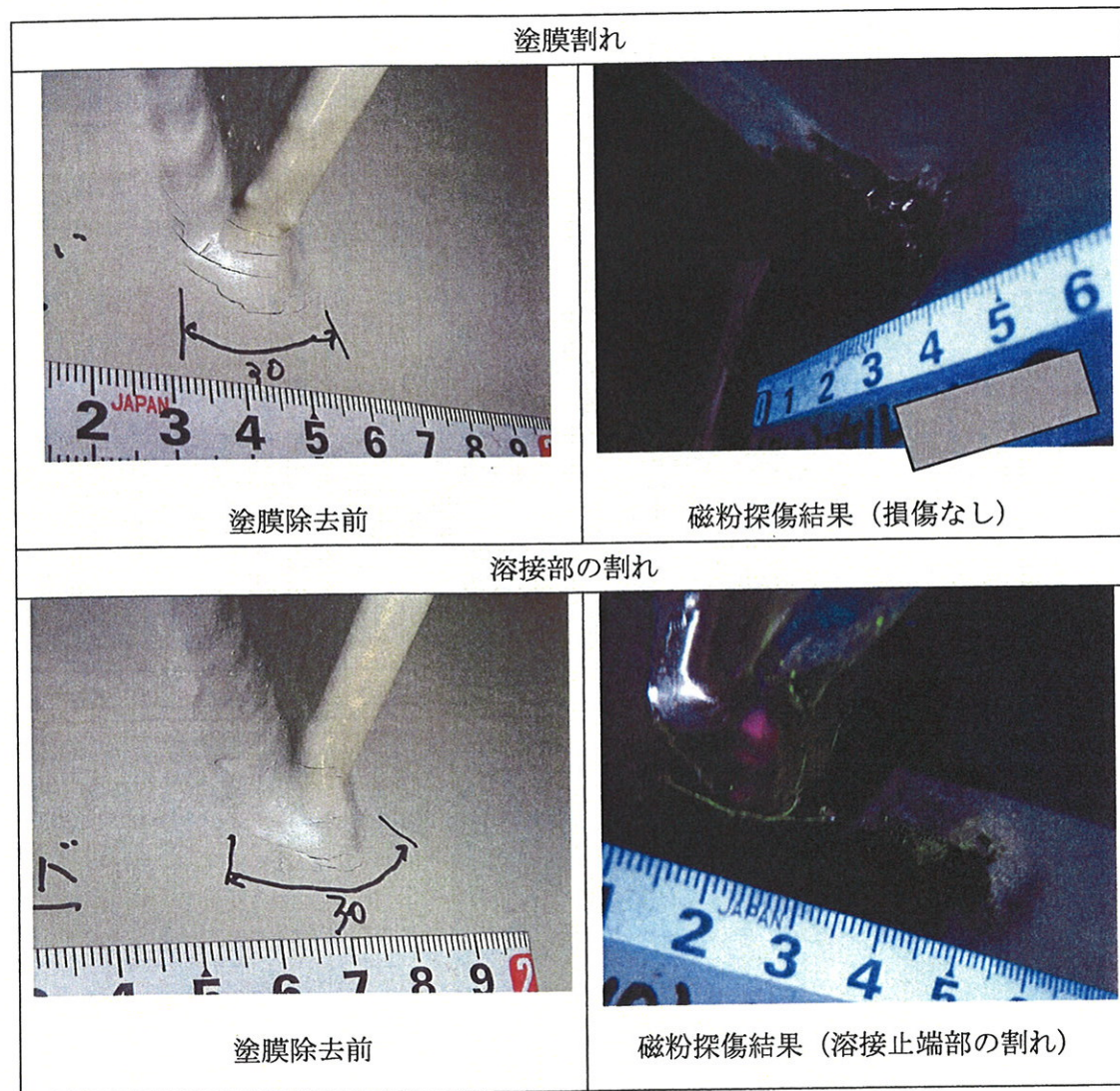


表.2-2-11 塗膜割れおよび溶接割れの事例 (その1)

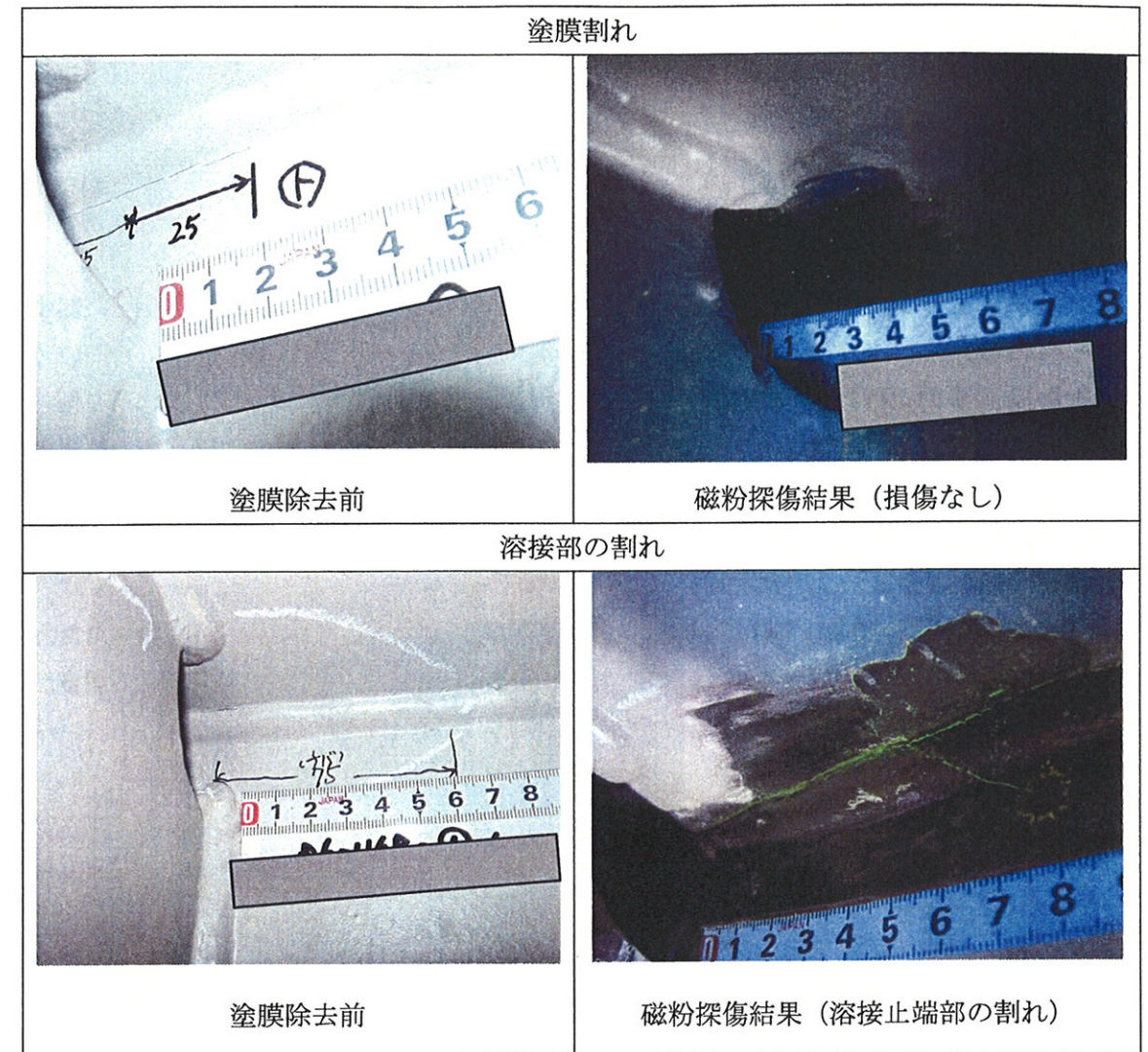


表.2-2-12 塗膜割れおよび溶接割れの事例 (その2)

表. 2-2-11 現場環境の事例：遠望目視

i) 電源、照明の確保

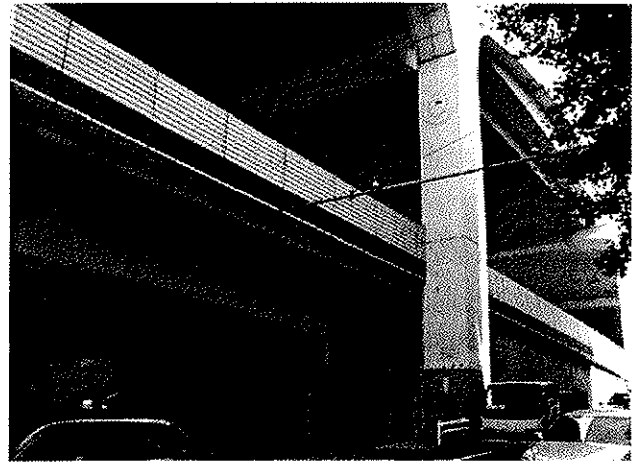
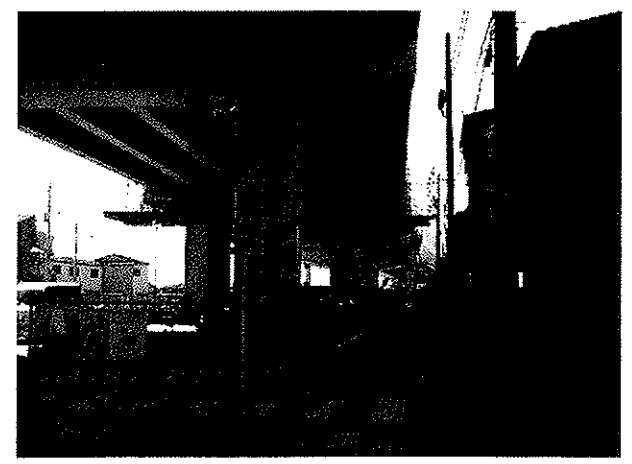

一般的な橋梁には測定機器類用の商用電源、照明機器がない場合がほとんどであり、近接目視点検を実施するには電源、照明の確保が第一に必要となる。路面照明用の商用電源は確保されているので、維持管理用の簡単な電源設備が箱桁内や点検通路に設置されていても良いと考えられる。また、これに代わる簡易な電源装置の開発が望まれる。

j) 遠望目視の障害物

遠望目視点検では、桁下から双眼鏡などの簡易な装置を用いて鋼桁、床版の状態を確認するが、付属物や桁下の設備が障害となり、遠望からの目視点検が出来ない場合も多い。表. 2-2-13 の事例 19 は裏面吸音版が障害となり鋼桁や床版が桁下から確認できない事例、事例 20 は電線設備が障害となり桁、支承周りの遠望目視が出来ない事例、事例 21 は桁の落橋防止装置が障害となり桁端部の遠望目視が出来ない場合である。

k) 図面、補修履歴などの不備に対するニーズ

新設時や補修、補強時の設計図書、竣工図書の管理がうまく機能していない場合や、また、補修履歴も残っていない場合も多く、点検時に必要な図書が揃わないことが多い。各図書、補修、点検履歴の整備が必要である。

| | |
|--|--------------------------------------|
| <p>事例 19</p>  | <p>裏面吸音版があるため、遠望から鋼桁や床版の目視ができない。</p> |
| <p>事例 20</p>  | <p>電線設備のため、桁、支承の遠望からの目視点検ができない。</p> |
| <p>事例 21</p>  <p>落橋防止装置</p> | <p>橋脚上に落橋防止装置があるため、支承周りの遠望目視が困難。</p> |

2-2-6. 今後の技術開発への期待

鋼橋の維持管理の現場作業から、鋼橋点検・モニタリング技術の新技术に期待する事項としては、前項で示したアクセス、環境、機器などハード面への期待も大きいですが、新技术の開発、適用にあたっては、各種技術に求められる要求性能をコスト面も含めて正しく把握することが最も重要である。

点検の効率化を図るためには、渦流探傷装置など、比較的簡易な装置の実用化が有効であると考えられるが、一般的に、簡易であることと精度はトレードオフの関係にある。プラント、製鉄所などの工場では、要求される製品に応じて、その精度に応じた検査技術を適用している場合が多いが、鋼橋の現場では見つけるべき損傷の大きさが明確でないため、精度の良い検査をせざるを得ないのが実状である。点検頻度や構造物、部材の重要性、損傷の進展速度などから、損傷毎に見つけるべき損傷の大きさがはっきりすれば、検査機器に求められる要求性能も明らかとなり、簡易な装置の開発、実用化、適用が進むものと考えられる。

現在、各地で検討されている最新のセンサ、ITを活用した高度技術が橋梁の維持管理の現場に今ひとつ、導入されない理由としては、その技術が現在の目視点検を主体とした維持管理手法に対してどのような優位性があるのか明確でない点にある。これらの技術は、例えば①損傷位置の監視など着目部位がはっきりしている場合、②交通量の推定や過積載車の測定など、交通荷重や風荷重など外力を長期に渡り計測する場合、③地震時の地振動を観測したい場合など、着目位置が明確である場合か、データ収集を目的とした場合には有効であるが、現在のところ、直接、目視点検の代替となる技術にはなっていないことに注意が必要である。データ収集を目的とした技術としては、1章の疲労センサや腐食環境センサ、BWIMなど各種技術が開発されており、今後の益々の発展に期待したい。

現場で点検に携わる技術者は、構造物を直接、目で見えることを重要と考えており、その目視点検の精度を向上、かつ簡易にする技術の開発を望んでいる。とはいえ、公共投資が縮減する近年、近接目視点検の頻度を下げざるを得ない状況になる可能性が大きく、実際、地方自治体の管理する橋梁についてはほとんど詳細点検が実施されていない場合もある。その場合に問題となるのは、落橋事故など第三者災害をおよぼすような事故の発生である。その安全性を担保することを目的とすれば、最新のセンサや通信技術を用いた高頻度な常時あるいは定期モニタリングシステムに優位性があるものと考えられる。それらのモニタリング技術に求められる性能は、局所のひずみや加速度、変位を計測、もしくは局所的な腐食、ひびわれ、疲労き裂を発見するものではなく、落橋や走行安全性の確保など、精度はそれほど高くなくても、橋全体、路線全体の安全性をばんやりとでも、目視点検の費用以下で常時監視できることである。

1章の紹介した新技术の中では、たとえば光ファイバについては、①計測範囲が広い、②1本のファイバで多くの測定点を計測可能である、③耐久性に優れている、といった特徴から、橋梁全体、路線全体の監視に有効な手法になりうると考えられる。今後、センサ、計測

装置の低価格化や精度向上に期待したい。

2-3. 鋼橋の点検・モニタリングの実例

鋼橋の点検・モニタリングの実例に関する資料は多く、例えば文献 2-7)などに多数の事例が報告されているほか、最近では関連する国際会議も数多く開催されている。特にモニタリングの実施例は多数に及んでおり、それらを網羅して紹介することは困難であるため、ここでは、これまでの文献であまり取り上げられていない最近の事例についていくつか紹介する。

2-3-1. 韓国の橋梁計測の事例

韓国の橋梁でモニタリングシステムが本格的に導入されたのは1994年10月に起こった聖水(ソンス)大橋の崩壊事故以後である。この事故がきっかけとなり、1995年に施設物の安全点検及び維持管理に関する事項の規定である“施設物の安全管理に関する特別法”を公表することになった。この法を基に全ての施設物を1種及び2種として分類し、建設交通部の細部指針によって指定した安全診断専門機関及び施設安全技術公団によって5年単位に安全点検及び維持管理計画を立案して実施するようにしている。

このような状況下で建設された韓国の橋梁は橋梁の維持管理の一環としてモニタリングシステムがほとんどの橋梁で構築されている。

ここでは、この中で韓国の代表的な二つの橋梁のモニタリングシステムについて述べる。

a) 西海(ソヘ)大橋

この橋梁は2000年11月に開通された総延長7,310mの海上橋梁であり、その概要を図.2-3-1及び表.2-3-1に示す。

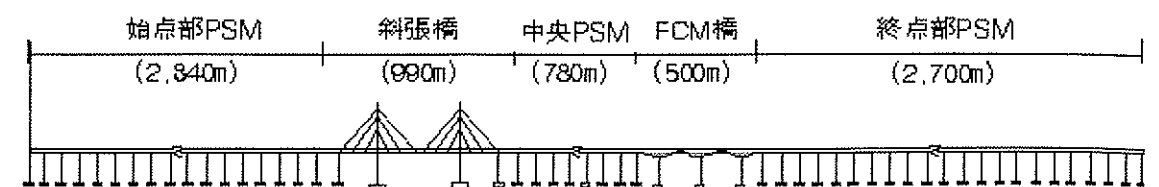


図.2-3-1 西海大橋の構成

表. 2-3-1 西海大橋の構造形式別の特徴

| 橋梁 | 斜長橋 | FCM 橋 | PSM 橋 |
|----------|----------------------------|-------------------------|---|
| 延長(主径間長) | 990m(470m) | 500m(165m) | 5,820m(60m) |
| SPAN 構成 | 60m+200m+470m +200m+60m | 85m+165m+165m+85m | 39@60m(2,340m)+13@ 60(780m)+45@60(2700m) |
| 上部構造 | 鋼合成 斜長橋 | 長径間 PSC BOX GIRDER | 連続 PSC BOX GIRDER |
| 下部構造 | 直接基礎 | 杭基礎 (Φ2,500m, 105 本) | 杭基礎 (89 基) 直接基礎 (13 期) |
| 通過高さ | 62m (5 万トン船舶出入可能) | 45m (2 万トン船舶出入可能) | - |

表. 2-3-2 西海大橋の一般の点検種類

| 区分 | 内容 | 頻度 | 現行法規 |
|--------|------------------------------|--------------------------|---------|
| 週間徒歩点検 | 徒歩による目視観察 | 1 回/週 | |
| 定期点検 | 目視及び接近可能部位の目視点検 | 1 回/半期 | 1 回/年 |
| 精密点検 | 初期点検 施設物管理のための初期資料の蓄積 | 竣工後 6 ヶ月以内 (構造形態の変更時) | 左同 |
| | 精密点検 橋梁全体に対する精密点検 | 1 回/年 | 1 回/2 年 |
| 緊急点検 | 特別点検 必要時(台風, 雨季, 欠陥発生時など) | 必要時 | |
| | 損傷点検 各種の事故などの構造物損傷の発生時 | 損傷発生時 | |
| 精密安全診断 | 精密目視検査, 検査測定装置による近接点検 | 竣工 10 年以後 5 年ごとに 必要時 | 左同 |

表. 2-3-3 西海大橋の企画点検の比較

| 区分 | 一般的な橋梁の点検方法 | 西海大橋の企画点検 | 備考 |
|------|--|---|----|
| 点検順序 | 径間別の順次的点検 (1 径間より 105 径間まで) | 損傷頻度が高い主要部材順に企画点検 | |
| 点検方法 | 径間別, 順次的にすべての部材(一つの径間にある橋座装置, 橋台, 橋脚, 伸縮装置など) 点検 | 主要部材別(橋座装置, 橋台, 橋脚, 伸縮装置など) 同時に一括点検 | |
| 特徴 | - 小規模の橋梁点検に適合 - 点検結果の一貫性の不足 - 補修工事の遅延 | - 長大橋梁の点検に適合 - 点検結果の一貫性の確保 - 点検結果の整理容易 - 補修工事が有利 | |

1) 西海大橋の点検種類及び点検方法

西海大橋の点検は西海大橋の特性を考慮し, 施設物管理に関する特別法を基本にして表. 2-3-2 の一般の点検に加えて, 点検業務の集中度を高め, 施設物の重要性を考えて, より強化された規定に基づいて点検を行っている。すなわち, 西海大橋管理所では限定された人員と期間で, より精密で効率的な点検のために, 発生した主要損傷を分析して, 損傷頻度が高い主要部材について集中した点検となるように表. 2-3-3 のような企画点検システムを計画して点検業務に効率性を高めている。橋梁及び主要部材に対する損傷の企画点検は点検の集中度を高め, 同一部材を短い時間に集中的に点検を行うことで, 点検一貫性の確保するものである。

2) 西海大橋の計測モニタリングシステム

西海大橋においては実時間モニタリングより収集された資料を用いて, 橋梁の安全性の評価及び使用性の増進を図っている。

西海大橋の計測モニタリングシステムは, 斜長橋区間, FCM 区間, PSM 区間の主要部位に表. 2-3-4 に示した計測センサ及びデータローガを通して構造物の応答信号を光通信によりリアルタイムで管理所へ伝送し, 計測サーバでこれら処理, 分析した後, その結果を蓄積し, 表示して橋梁の挙動履歴評価に必要な資料を提供し, 構造物の安全性を監視するシステムである。

表. 2-3-4 西海大橋の計測センサーの種類及び数量

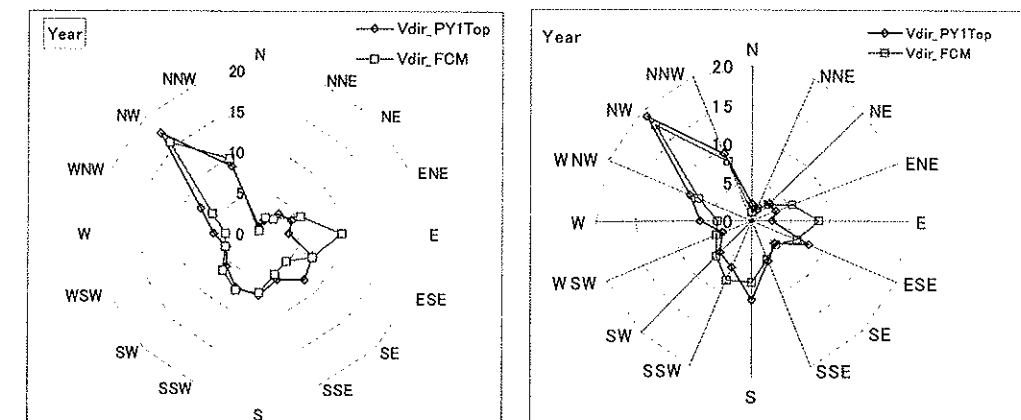
| 区分 | | 用途 | 数量 | 備考 |
|-------|-----------------|---------------------------------------|-----------------------------------|-----|
| ひずみ計 | 電気抵抗式 | 荷重作用による構造物の挙動特性の把握 | 斜長橋(44) PSM 橋(20) FCM 橋(20) | |
| | 振動弦式 | 荷重作用による構造物の挙動特性の把握 | 斜長橋(5) | |
| 伸縮装置計 | | 伸縮装置及び Shoe の挙動の異常有無の把握 (橋軸方向の伸縮量) | P39(1) P42(1) | |
| 荷重計 | | 時間による鋼線の緊張力の変化の追跡 | PSM 橋(2) FCM 橋(2) | |
| 地震計 | | 地震発生時の地震荷重の強度及び影響の把握 | 斜長橋(2) | |
| たわみ計 | レーザ式 | 橋梁上部構造の鉛直変位の変化把握 | 斜長橋(1) | |
| | 円筒管式 | 1/2 径間部のたわみ管理後の追跡分析 | PSM 橋(1) FCM 橋(2) | |
| 傾斜計 | | 荷重作用による主塔の挙動把握 | 斜長橋(6) | |
| 加速度計 | Force Balance 型 | 動荷重による構造物の応答特性の把握 | 斜長橋(10) PSM 橋(2) FCM 橋(2) | 2 軸 |
| | Piezoelectric 型 | ケーブル振動を用いたケーブルの張力測定 | 斜長橋(24) | |
| 温度計 | | 温度変化によるコンクリート応力及びケーブル張力の変動測定 | 斜長橋(14) FCM 橋(8) | |
| 風向 | 超音波型 | 構造物に作用する風荷重の影響把握 | 斜長橋(2) | |
| 風速計 | Propeller 型 | 構造物に作用する風荷重の影響把握 | FCM 橋(1) | |
| 洗掘計測計 | | 海底地盤の洗掘有無の測定 | PSM 橋(3) FCM 橋(2) | |
| 計 | | 総 10 種類 | 175 個 | |

・ 風速及び風向のデータ分析

西海大橋に設置された二つの風速計により得られた風速データ及び年間風向をそれぞれ表. 2-3-5 及び図. 2-3-2 に示す.

表. 2-3-5 風速データ

| 年度 | FCM 橋の床版(m/s) | | PY1 塔頂部(m/s) | | 備考 |
|------|----------------|---------------|---------------|---------------|---|
| | 瞬間最大 | 10 分平均最大 | 瞬間最大 | 10 分平均最大 | |
| 2001 | - | 18.56* | - | 19.63 | *: 斜長橋の主径間床版の測定値 |
| | - | - | - | - | |
| | - | (03.04 19:18) | - | (03.04 16:48) | |
| 2002 | 32.92 | 21.54 | 33.33 | 25.88 | |
| | 300.4°(NW) | 313.6°(NW) | 53.1°(NE) | 37.2°(NE) | |
| | (03.30 17:39) | (01.08 02:16) | (08.31 23:38) | (08.31 22:18) | |
| 2003 | 29.55 | 22.34 | 25.71 | 20.19 | |
| | 315.6°(NW) | 319.9°(NW) | 77.4°(E) | 320.8°(NW) | |
| | (01.29 00:24) | (01.29 00:14) | (07.03 05:21) | (01.29 00:24) | |
| 2004 | 27.8 | 21.1 | 29.2* | 22.0 | *: 斜長橋の塔頂部超音波型の測定値 |
| | 194.96°(SW) | 317.9°(NW) | 163.9°(SE) | 194.2°(SW) | |
| | (03.10 16:43) | (02.05 04:19) | (03.10 10:07) | (05.19 15:29) | |
| 2005 | 35.78** | 23.07 | 28.05 | 22.29 | ** Propeller 型の測定範囲(0~60m/s)にある値について正常計測値に認める |
| | 302.17°(NW) | 301.8°(NW) | 211.76°(SW) | 193.46°(SW) | |
| | (08.18 19:47) | (04.20 02:20) | (02.22 17:15) | (04.06 14:55) | |



(a) 2004 年

(b) 2005 年

図. 2-3-2 西海大橋の年間風向

風のデータより 10 分間の平均風速の最大は 23.07m/s(2005.4.20, FCM)であり、瞬間最大風速は 35.48m/s(2005.08.18)で強い突風も発生することが分かる。また、5 年間のデータを設計静的風荷重と比べると、概ね設計風荷重の 45%であることも分かる。

・ 交通荷重の水準

供用中の交通活荷重の大きさは車両の渋滞の長さあるいは回数に影響を受ける。本橋の場合は、両方向同時の渋滞はほとんどないが、週末の交通荷重により一方向の渋滞が発生している。補剛桁の桁下部フランジのひずみデータより概略的な活荷重の大きさを推定した。

図 2-3-3 に開通以後の鋼桁の下部フランジの応力範囲と交通量を月別に示した。活荷重による応力範囲は一番大きい 2002 年 11 月の資料を見ると、LL14 (側径間) の鋼桁の下り線の下部フランジに $-4.46 \sim 10.53 \text{ N/mm}^2$, L17 (中央径間) の鋼桁の下り線の下部フランジに $-4.65 \sim 12.82 \text{ N/mm}^2$ の活荷重応力を観測している。これは活荷重による設計上の応力 $-85.2 \sim 106.0 \text{ N/mm}^2$ (LL14), $-81.0 \sim 109.7 \text{ N/mm}^2$ (L17)に比べると 5~12%程度であり、部材の余裕が多いことがわかる。これは斜張橋のような長大橋では、韓国の道路橋設計基準による活荷重載荷方法が厳しい基準を課していることを示唆している。

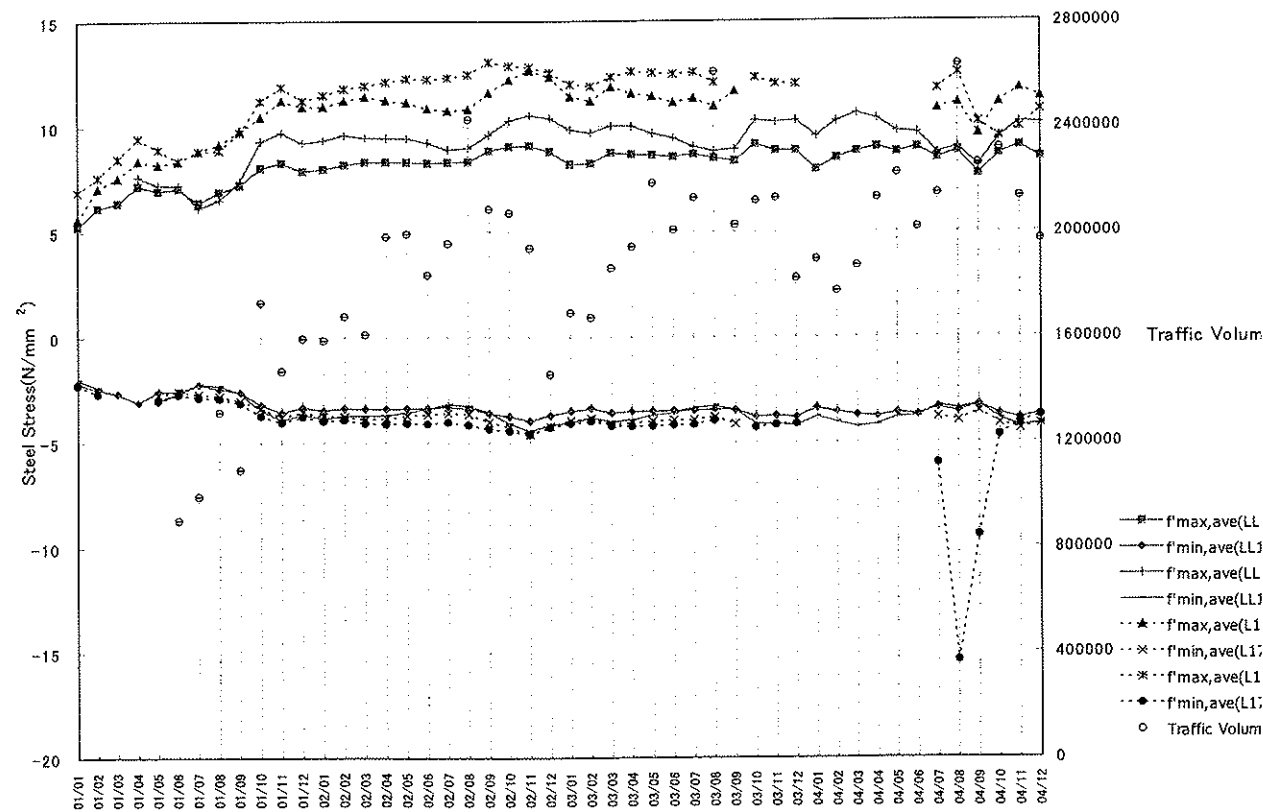


図 2-3-3 開通以後 LL14 区間と L17 区間の鋼桁の応力範囲の比較

・ 主塔傾斜

斜張橋の二つの主塔の傾斜の変化を図 2-3-4 に示す。年間周期の温度の影響変化と共に長期的には趨勢分析を通してわかるように、Creep と乾燥収縮によって PY1 は Tangjin 方向、PY2 は Pyeongtaek 方向に緩やかに傾いていることが分かる。

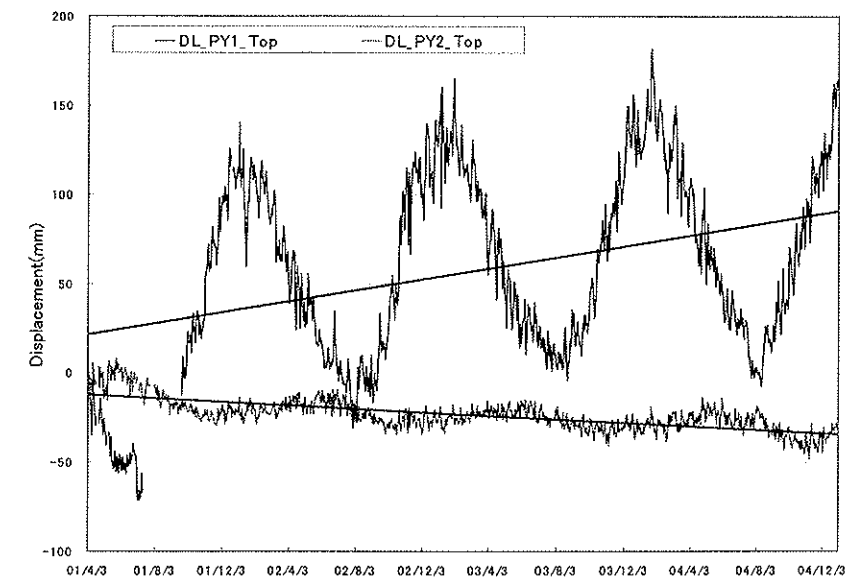


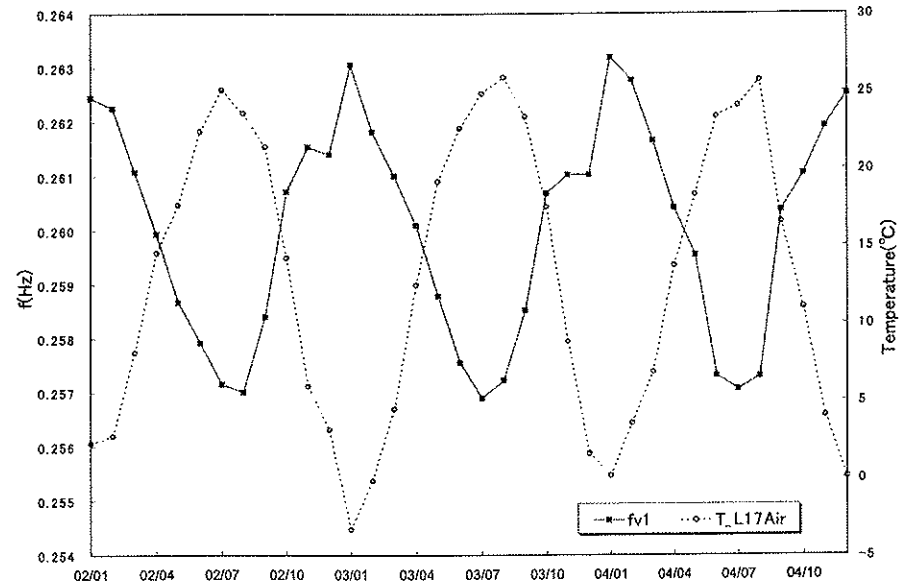
図 2-3-4 主塔傾斜変位

・ 動的挙動

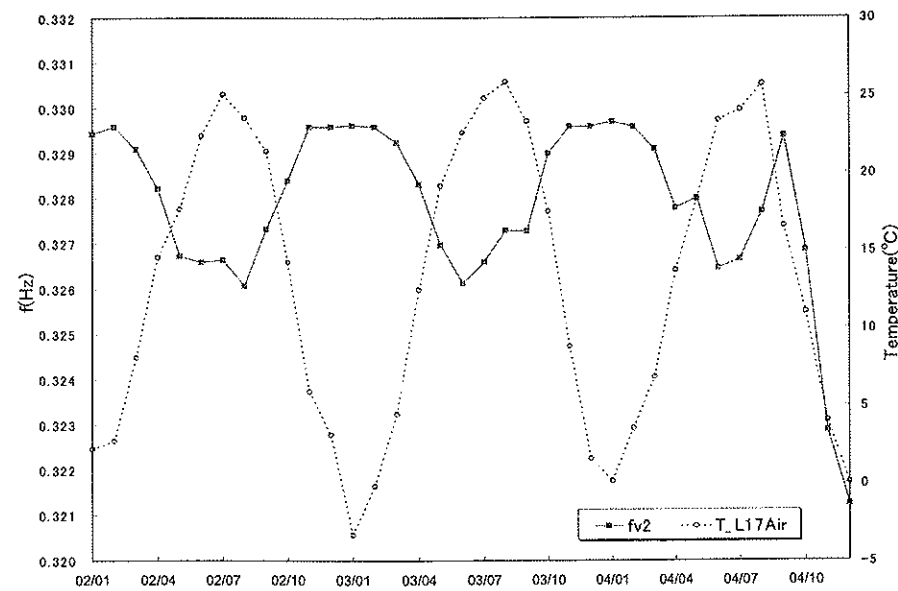
西海大橋の補剛桁の主要モードである 1 次及び 2 次の垂直モードについて整理すると図 2-3-5 のようになる。温度によって初期載荷試験値に比べて、 f_{v1} は $-1.21 \sim 1.21\%$, f_{v2} は $-2.01 \sim 0.57\%$ で比較的小さい値である。これは数値解析モデルで断面剛性を低下させたり、ケーブルの破断を仮定して解析した結果で得られる固有振動数の変化量 2%と比べると相対的に大きい値である。したがって、高次の不静定構造物における動特性による状態評価あるいは損傷探傷を行う場合、温度による固有振動数の変化を考慮すべきであることが分かる。

3) まとめ

西海大橋の維持管理システムにおいては、維持管理業務での客観化及び体系化を図ることにより効率的な維持管理を行っており、この維持管理システムの開発及びその後の実績を通して蓄積された維持管理のノウハウは韓国の橋梁維持管理業務に多くの役割を果たすものと考えられる。



(a) 1次垂直 Mode



(b) 2次垂直 Mode

図. 2-3-5 月別の固有振動数と温度との関係

b) 永宗 (Yeongjong) 大橋

1) 概要

永宗大橋は Incheon 国際空港を結ぶ唯一の橋梁で、総延長は 4,420m であり、三つの橋梁形式、すなわち吊橋 (550m)、トラス橋 (2,250m)、鋼合成橋 (永宗側 1,140m、仁川側 48m) で構成されている。

吊橋は図. 2-3-6 に示したように自碇式であり、主ケーブルが補剛桁トラスの両端に定着され補剛桁及びトラスが圧縮力及び上向き偏心を受ける構造になっている。上部構造は 6 車線であり、下部道路は 4 車線 (鉄道の複線含む) の道路鉄道併用の複層ワーレントラス構造になっている。主ケーブル間の間隔は支間中央及び端部では橋梁の幅員程度であるが、Diamond の形状を持つ主塔位置では 3m の間隔となる Mono-duo Type の 3 次元ケーブル型式になっており、ハンガーケーブルも 10°内外の傾斜を持ってある。

自碇式吊橋の断面は世界最大容量で主径間は 300m であり、側径間は 125m である。設計基本風速は 40m/s であり、主桁高さでの最大設計風速は 55m/s である。主要設計及び施工項目は表. 2-3-6 に示した通りである。

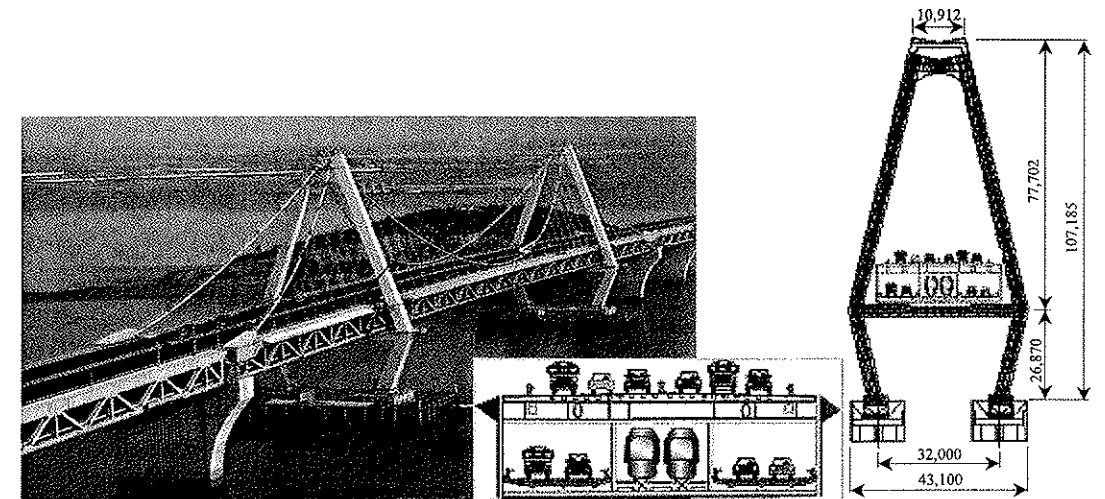


図. 2-3-6 永宗大橋の全景

表. 2-3-6 永宗大橋の規模及び主要設計条件

| 項目 | 内容 | |
|----|-------|--|
| 規模 | 上部構造 | 2層 Warren Truss (鉄道+道路併用) |
| | 主塔 | Diamond 式鋼構造 (h=107m) |
| | 主ケーブル | 溶融亜鉛塗金平行鋼線ケーブル(A/S 工法適用) (1cable=14 strands=6,720 wires) |
| | ハンガ | 84mm Center Fit Rope Core(CFRC) |
| | 下部工 | 主塔部:Newmetic cassion, 端部:現場打ち杭 (1,500mm/m) |

| | | |
|------|------|------------------------|
| 設計条件 | 設計速度 | 道路:100km/h, 鉄道:110km/h |
| | 設計荷重 | 道路:DB24(DL24), 鉄道:Q25 |
| | 基本風速 | 40m/s |
| | 設計震度 | 0.14g |

2) モニタリングシステムの概要

吊橋の構造挙動をモニタリングするために、表. 2-3-7 に示した風向風速計, 温度計, 加速度計, 地震計, 伸縮装置計, 静動的変位計, 傾斜計, たわみ計などの 8 種類のセンサを設置した。

表. 2-3-7 泳宗大橋に設置されたセンサの種類

| センサ | 形式 | 設置位置 | 個数 | 備考 |
|---------|---|---|-----|--------------------|
| 風向風速計 | ultrasonic type propeller type | ・主塔 E1, W1 頂部 | 4 | 動的 (4Hz) |
| | | ・上路中央径間 1/2 支点 | 1 | |
| | | ・下路中央径間 1/2 支点 | | |
| 加速度計 | forced balanced type piezoelectric type | ・主塔 頂部, 1/2 支点 | 20 | 動的 (60Hz) |
| | | ・ハンガ 12 個 補剛桁中央径間 7/24, 3/4 及び 1/2 支点, 側径間 5/12 | 12 | |
| 傾斜計 | electrolytic type | ・補剛桁 位置, 中央及び塔頂 | 10 | 静的 |
| レーザたわみ計 | optoelectronic type | ・中央径間 1/2 内. 外側, 側径間 1/2 ・接属橋 1/2 支点 | 5 | 動的 (10Hz) |
| ひずみ計 | vibrating wire type (static) electric resistance type (dyn.) | ・補剛桁トラス 中央径間 1/2, 主塔 支点 | 174 | 静的 動的 (20Hz) |
| | | ・ケーブル定着部定着板, shoe rod | 116 | |
| | | ・端部 支点 end link | | |
| 温度計 | platinum resistance type | ・ケーブル 7 支点 主塔 補剛桁 位置 ・補剛桁 内部 上. 下 トラス 垂直材 下部 | 45 | 静的 |
| 地震計 | force balanced type(3 軸) | ・E1 及び W1 主塔 塔基部 | 2 | 動的 (60Hz) |
| 伸縮ひずみ計 | potentionmeter type | ・主塔 E2 及び W2 | 4 | 静的 |
| 計 | | | 393 | |

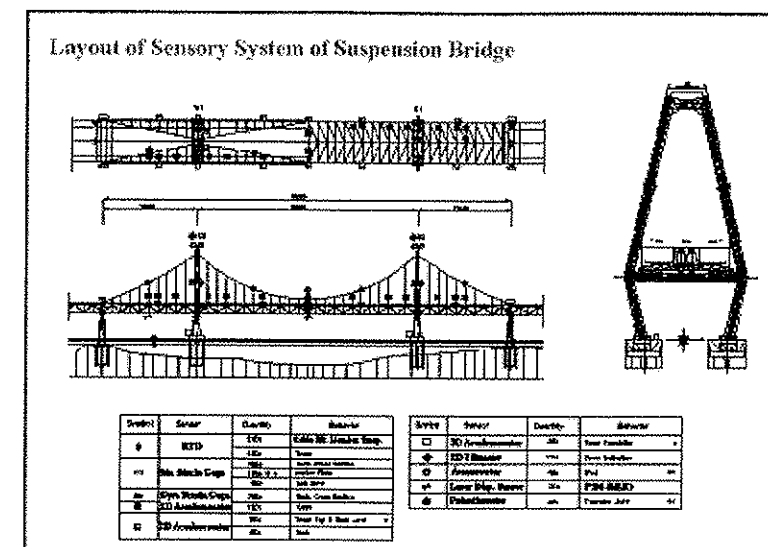


図. 2-3-7 泳宗大橋に設置されたセンサの位置

計測モニタリングシステムの構成はセンサシステム, データ収集及び伝送システム, データ処理及び分析システム, ケーブル Network システムの 4 つの Subsystem で構成されている。システムの運用内容は計測データ DB 管理, 実時間データ処理及び解析, 管理基準による判断 DB システム (pre- and post-triggering) 及び警報システムなどである。

データ収集 (DAQ) システムは橋梁上に設置された静動的 Data-Logger であり, 使用された Data-Logger は総 23 個 (静的 8 個, 動的 15 個) で光通信網を通して繋がっている。図. 2-3-8 に吊橋の主要位置で設置されたデータ収集及び光通信 Network System を示した。DAQ System はセンサより信号を収集し, Digital 信号に変換した後, 光ケーブルを通してデータ処理及び分析システムへ伝送する。

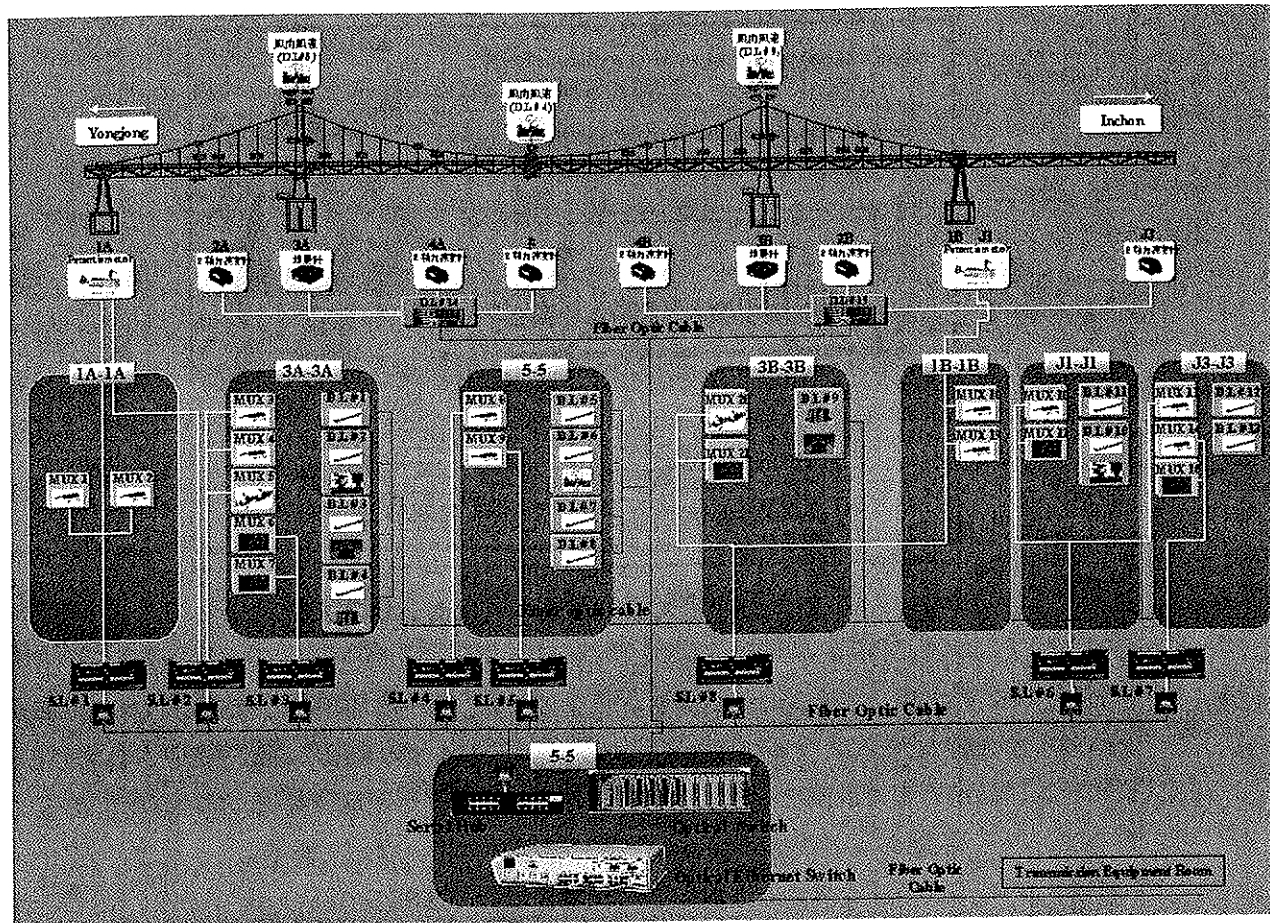


図. 2-3-8 データ収集及び光通信 network システム

3) モニタリングシステムの運営事例

この橋は道路及び鉄道の併用橋梁で、まず 2000 年 12 月道路部が開通されて供用中であり、鉄道部は 2007 年 3 月に開通された。ただし、2004 年 9 月に軌道設置のための縦桁及び管理路設置工事を完了し、それ以降軌道及び電気設備を除いてほとんどの鉄道の死荷重が載荷されている。

維持管理 5 年目の時点で鉄道の縦桁及び管理路設置による死荷重が増えて、ハンガの張力変化、主塔傾斜、補剛桁 Camber 量の変化、構造物の動的特性が発生した。ここでは、このような鉄道の死荷重の設置前後の構造挙動の履歴変化をモニタリング結果及び解析結果を比べて健全性を検討する。

・ 鉄道死荷重

鉄道軌道設置のための図. 2-3-9 に示す縦桁及び管理路設置工事によって吊橋 550m 区間で死荷重が 1.906tonf/m 増えている。これは最初の設計死荷重である 2.51tonf/m の 76% の水準で鉄道関連死荷重の比重が少し小さくなっている。このため 補剛桁の全体死荷重は 3.8% 増加したことになる。

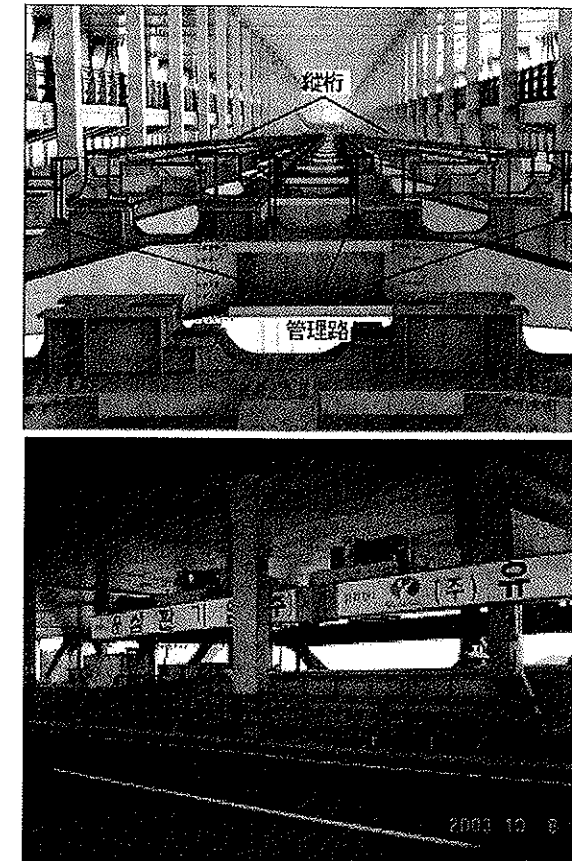


図. 2-3-9 鉄道縦桁及び管理路の設置

・ハンガ張力のモニタリング

吊橋のハンガロープは床版に作用する荷重を主ケーブルへ伝える役割を果たす。そのため維持管理の際に、ハンガの張力管理を行うことは重要な項目の一つである。ハンガ張力はハンガ張力計算 Module で加速度計より得られた図. 2-3-10 に示した時間履歴を FFT 周波数分析及び線形回帰分析を通して実時間で計算される。

ハンガの張力を推定するために設置された加速度計は図. 2-3-11 に示すように南北側にそれぞれ 6 個ずつ設けられている。図. 2-3-12 に示したように鉄道の死荷重設置前のハンガ張力は月平均 80.4 トン(夏)~81.6 トン(冬)の分布を示したが、鉄道死荷重が載荷された後、ハンガの張力は月平均の 82.7 トン(夏)~84.2 トン(冬)でそれぞれ全体の平均 2.3 トン~2.6 トン程度増加された。これは表. 2-3-8 に示した現場計測結果、モニタリング履歴結果及び構造解析結果を比較すると精度よく一致していることが分かる。鉄道縦桁及び管理路設置によって増えたハンガの張力は平均 2.54 トンであり、個別のハンガの増加量は図. 2-3-13 の通りである。

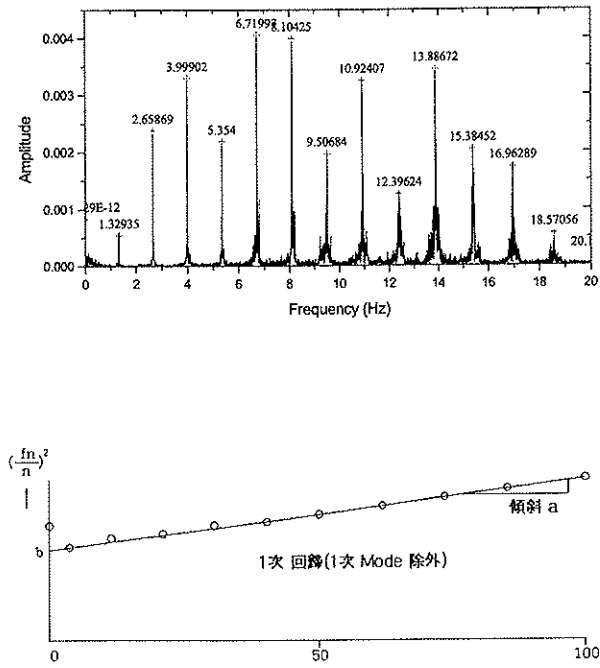


図. 2-3-10 張力分析の節次(実時間 FFT 分析結果, 1次回帰分析結果)

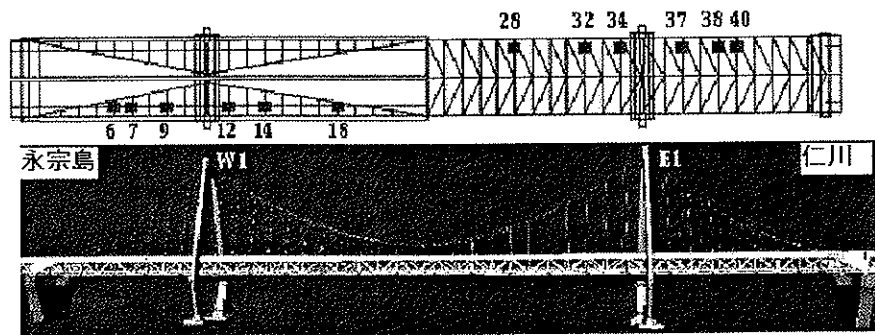


図. 2-3-11 加速度計の設置現況

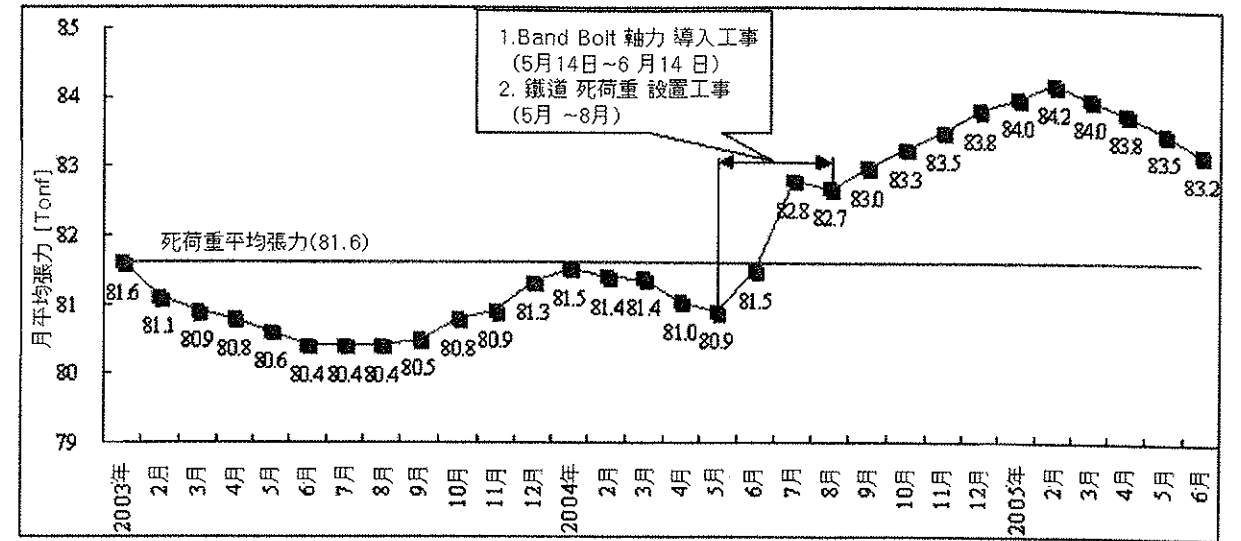


図. 2-3-12 季節別の月平均のハンガ張力履歴

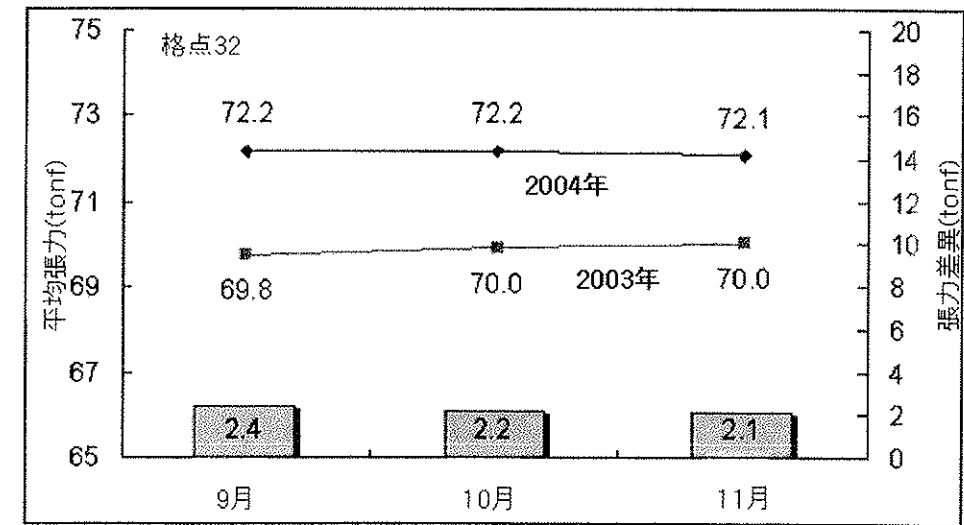


図. 2-3-13 個別ハンガの張力増加量(32番ハンガ)

表. 2-3-8 ハンガ張力の増加量の分析結果

| 比較項目 内容 | 現場計測 分析結果 | 計測モニタリング 履歴結果 | 構造解析結果 |
|----------------|----------------------|-----------------------|------------------------|
| 格点別張力 平均増加量 | +2.55 トン | +2.54 トン | +2.73 トン |
| 備考 | 32個 ハンガロブ (8個 格点) | 12個 ハンガロブ (12個 格点) | 312個 ハンガロブ (78個 格点) |

・補剛桁のたわみのモニタリング

補剛桁のたわみ変化は構造物の健全度評価で重要な検討項目である。吊橋でのたわみも季節により Sine 挙動を表しており、鉄道死荷重の設置後に図. 2-3-14 及び表. 2-3-9 に示したように Baseline が 41.4mm 以下に低くなって挙動している。

2005 年 5 月に载荷試験を行った。代表的な载荷の状況は図. 2-3-15 に示すように、中央径間に 12 台の DumpTruck 载荷及び中央径間に 12 台の DumpTruck の偏载荷である。この際のたわみをレーザたわみ計を使って測定した。測定結果と汎用構造解析 Program である MIDAS による解析の応答比(実験/解析)は 0.93~0.94 であり、両者は一致していることが分かる。

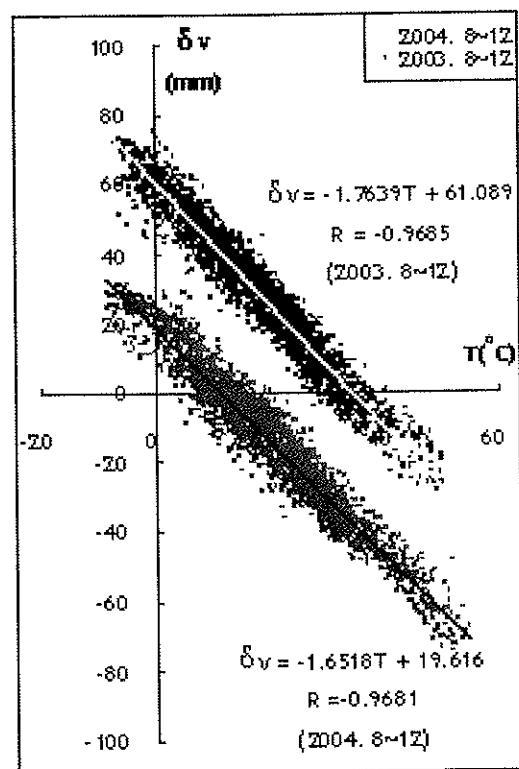


図. 2-3-14 補剛桁のたわみ baseline の変化 (41.4mm)

表. 2-3-9 たわみ履歴の分析

| 年 項目 | 度 | 温度平均たわみ変化 量 | 活加重たわみ変化量 | 備考 |
|---------|---|----------------|-----------|-----------|
| 2002 | | 103.1mm | 155.9mm | 1.0 |
| 2003 | | 103.9mm | 148.9mm | 前年対比 0.95 |
| 2004 | | 178.7mm | 209.8mm | 前年対比 1.35 |

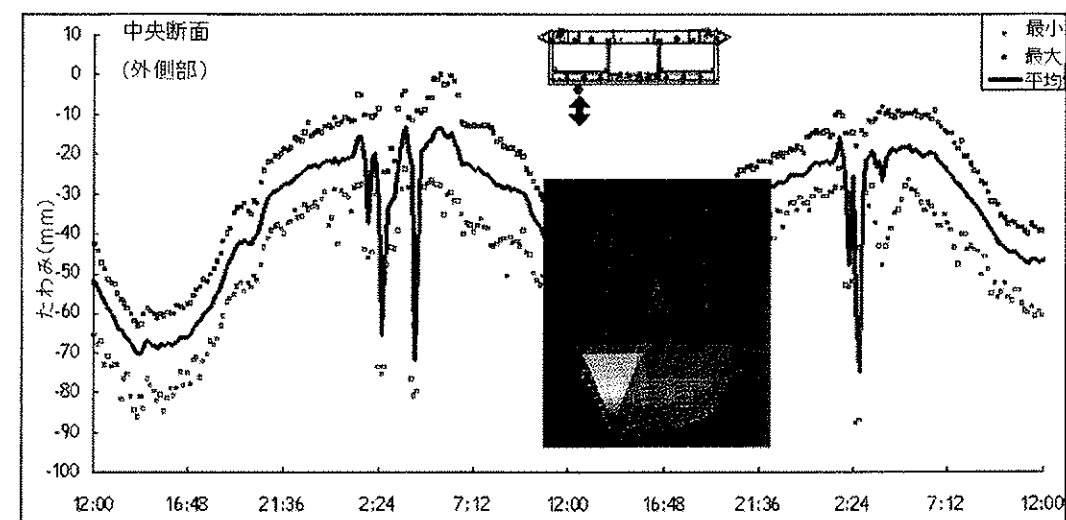
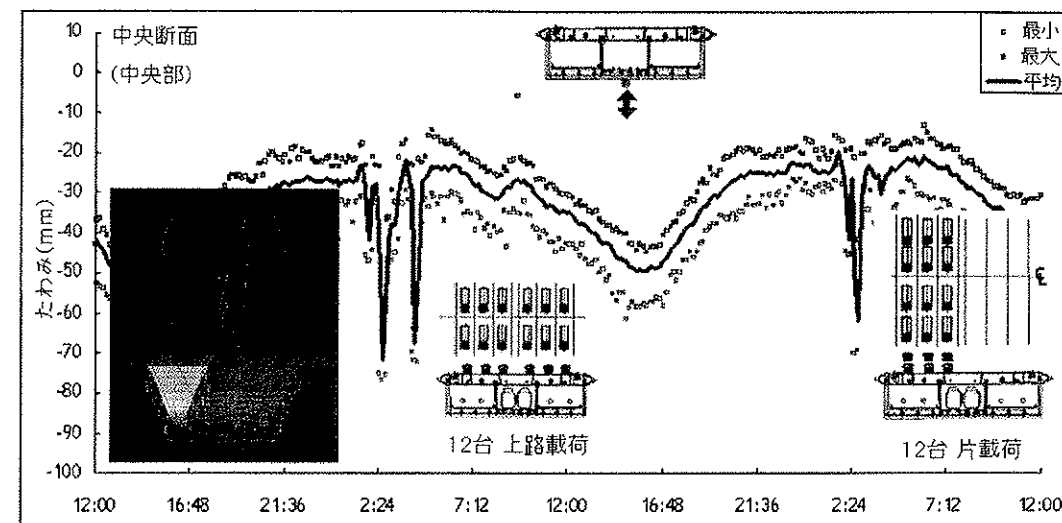


図. 2-3-15 大規模の载荷試験の分析結果

・補剛桁の動特性分析

吊橋の耐風設計の因子は供用前の大型加振実験を通して検証しており、振動実験、鉄道死荷重の設置前後の常時微振動波より分析した吊橋の曲げ 1 次及び 2 次、ねじり 1 次及び 2 次の固有振動数をそれぞれ表. 2-3-10 に示す。補剛桁の年間 1 次固有振動数は図. 2-3-16 に示すように季節的な要因によって一定的な形で変化している。鉄道死荷重の設置によって死荷重が 3.8%増加しており、固有振動数は-1.84% (曲げ 1 次) 及び-1.21% (曲げ 2 次) 低くなっている。このような固有振動数の変化は構造解析結果と良く一致していると言える。2003 年及び 2005 年の周波数分析結果を図. 2-3-17 に示す。

表. 2-3-10 振動モード別の固有振動数の比較

| 分析結果 死荷重 | 振動モード | モニタリング結果 [Hz] | 解析結果 [Hz] | 振動実験結果 [Hz] |
|-------------|-------|---------------|-----------|-------------|
| 鉄道縦桁 設置前 | 曲げ 1 | 0.498 | 0.496 | 0.487 |
| | 曲げ 2 | 0.836 | 0.830 | 0.810 |
| | ねじり 1 | 1.074 | 1.066 | 1.060 |
| | ねじり 2 | 1.703 | 1.705 | 1.700 |
| 鉄道縦桁 設置後 | 曲げ 1 | 0.483 | 0.487 | - |
| | 曲げ 2 | 0.817 | 0.815 | - |
| | ねじり 1 | 1.057 | 1.060 | - |
| | ねじり 2 | 1.698 | 1.700 | - |

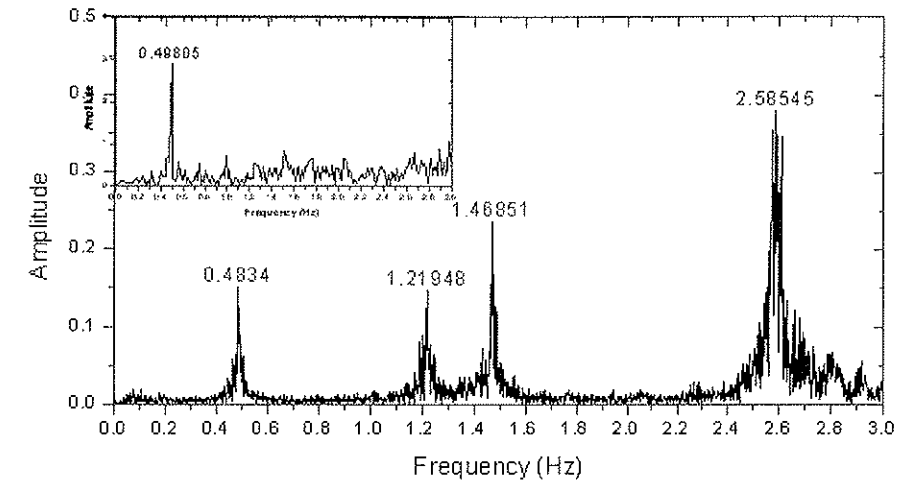


図. 2-3-17 曲げ1次固有振動数の変化(2003, 2005年)

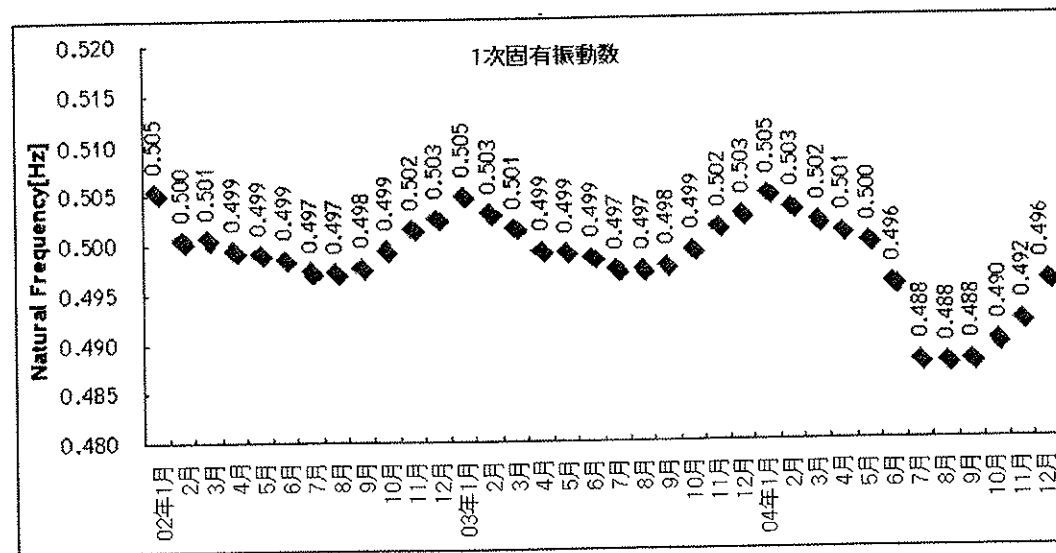


図. 2-3-16 補剛桁の固有振動数の履歴変化

4) まとめ

道路鉄道の併用橋梁である泳宗大橋の吊橋は道路部の供用中に鉄道の縦桁及び管理路の設置工事によって死荷重が増えており、これより構造系の変化が発生した。このような構造系の変化による構造物の挙動を健全度モニタリングシステム及び構造解析を通して、その結果を比較、分析した。現在は载荷試験及び形状測定の結果を検討して管理基準の変更及び構造解析モデルに対する Calibration を行っている。

以上韓国にある代表的な長大橋で行っているモニタリングシステムの運営とその利用事例を紹介した。資料を提供して頂いた関係者に深く感謝の意を表す。

2-3-2. かりこぼうず大橋における動態観測システム

a) 動態観測の背景

「かりこぼうず大橋」の概要を表. 2-3-11 に、一般図を図. 2-3-18 に示す。

本橋は、橋長 15m の単純桁、50m のキングポストトラス 2 連、25m のキングポストトラス 1 連で構成される大規模木橋である。本橋の特徴は、地元の主要産業でもある杉材を使用した集成材を主部材に採用していること、周囲の山並みの景観を配慮してキングポストトラス形式を採用したこと、下弦材を集成材と PC 鋼棒の合成構造としたことなどがある。

表. 2-3-11 かりこぼうず大橋の概要

| | |
|----------|-------------------------|
| 上部工形式 | 単純桁橋+キングポストトラス橋 3 連 |
| 下部工形式 | 逆 T 式橋台、円形柱張出し式橋脚 |
| 道路規格 | 第 3 種 第 4 級 |
| 設計活荷重 | A 活荷重 |
| 橋 長 | 140m (15m+50m×2+25m) |
| 支 間 長 | 14.3m+48.2m+48.2m+23.2m |
| 有効幅員 | (車道) 7.0m |
| スギ構造用集成材 | 日本農林規格強度等級 E75-F240 |
| 鋼 部 材 | SM490Y, SM400, SS400 |
| P C 鋼 棒 | SBPR φ 23, φ 32 |
| 木材使用体積 | 1330m ³ |
| 鋼 重 | 305ton |

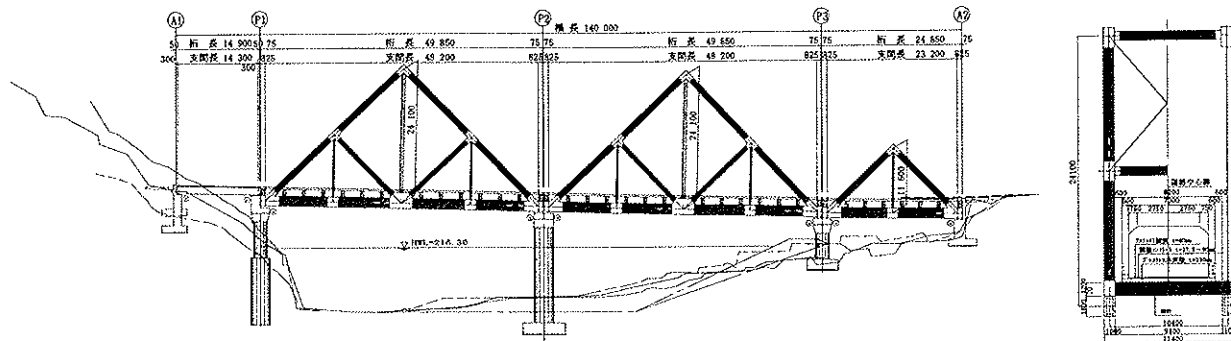


図. 2-3-18 全体一般図

木橋の維持管理においては、部材外面の損傷や劣化の早期発見および補修が重要であるが、それ以上に内部劣化の把握・評価も重要である。本橋においても損傷・劣化の早期発見と補修を目的として、定期的な点検が計画され実施されているが、目視を主体とした点検だけでは内部劣化を早期の段階で把握することは難しい。

構造的に重要な格点部や木部材の内部劣化は、構造の剛性低下につながると考えられることから、形状の変化、固有振動数の変化を検出することは内部劣化を評価する有効な方法と考えられる。以上から本橋では、形状の変化と固有振動数に着目した動態観測を実施した。

b) システム構成

動態観測のシステム構成を図. 2-3-19 に示す。本観測システムは次の特徴を有する。

- ① 観測点からのデータ転送には、無線 (2.4GHz 帯スペクトラム拡散方式) を利用
- ② 橋梁側の観測機器用の電源として、太陽電池とバッテリーを使用
- ③ 動的データの観測を目的として、サンプリング間隔は 100Hz

④ 観測場所から離れた管理場所で、観測システムの状況をモニタリング可能

観測は、設定した時間帯に自動的に実施して、現場付近の浄化センター内に設置したパソコンに無線でデータを伝送して記録する。記録されたデータは、必要に応じてパソコン上で計算処理し、この処理結果も記録する。また、観測現場から離れた管理者の要求に応じて、観測システムの稼働状態と観測結果を送信できる。パソコン上に記録した観測データは、一定期間ごとに実施するシステムの保守作業時に回収するものとしている。観測方法と設置状況を表. 2-3-12、図. 2-3-20 に示す。

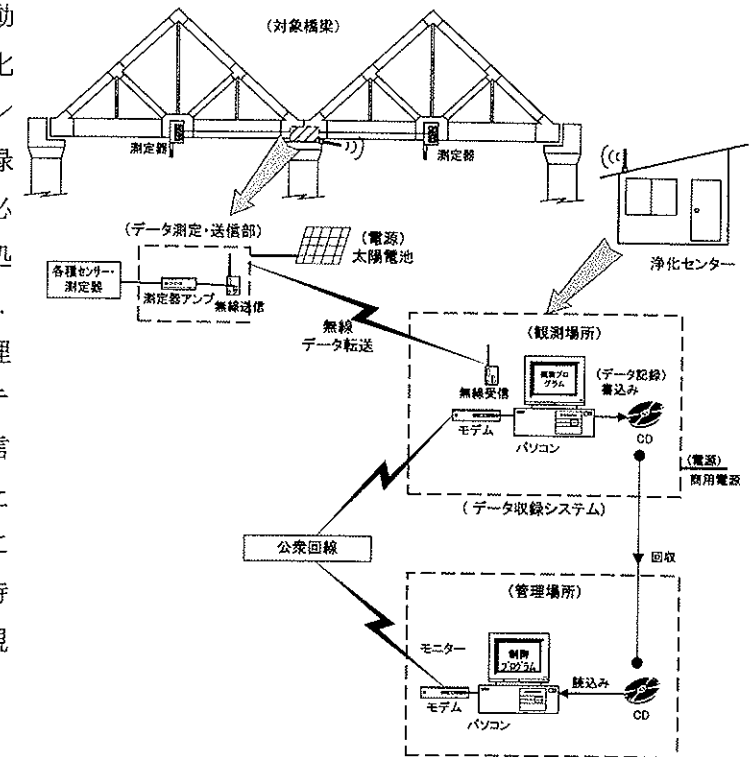


図. 2-3-19 動態観測システム構成

表. 2-3-12 観測方法と評価方法

| 観測項目 | 観測方法 | 評価方法 |
|-------|---|--|
| たわみ変位 | <ul style="list-style-type: none"> 橋脚天端間に糸を張り渡し、これにターゲットを取付けて橋梁側に固定したレーザー式変位計で相対変位を観測 最大 30mm までの下向きたわみ変形を観測できる ターゲットの振動があるので、平均値で評価する | <ul style="list-style-type: none"> 剛性 20%低下時の変形量を基準とする 季節的な変動を考慮 急激な変動を監視 |
| 固有振動数 | <ul style="list-style-type: none"> 加速度計で鉛直方向の振動を観測 ± 5 G の加速度を観測できる たわみ 1 次モードを対象として、固有振動数の変化を評価する | <ul style="list-style-type: none"> 剛性 20%低下時の変化量を基準とする 季節的な変動を考慮 急激な変動を監視 |

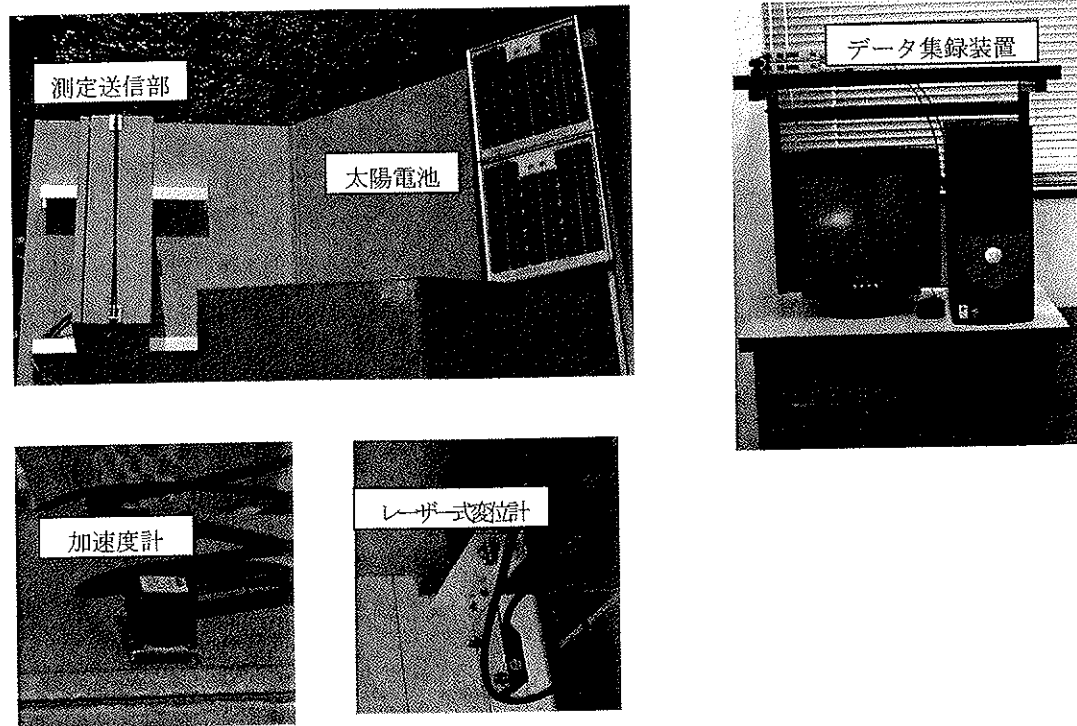


図. 2-3-20 観測システムの設置状況

c) 観測結果

動態観測の観測結果の例を図. 2-3-21 に示す。

この観測例は、橋桁の振動加速度の記録である。車輛が A1 側から本橋に進入し、4 連の橋が A1 側から順に振動しているのが分かる。

この観測データから、各観測データを対象として FFT によるパワースペクトル求め、各橋梁の固有振動数を推定した。求められたパワースペクトルの例として、大支間トラス橋 (P1-P2) を対象とした結果を図. 2-3-22 に示す。

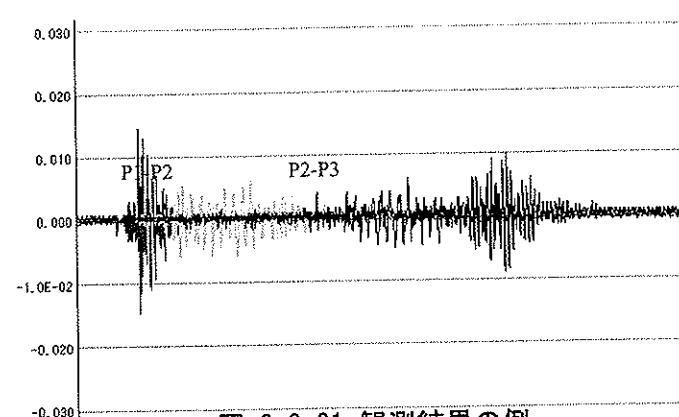


図. 2-3-21 観測結果の例

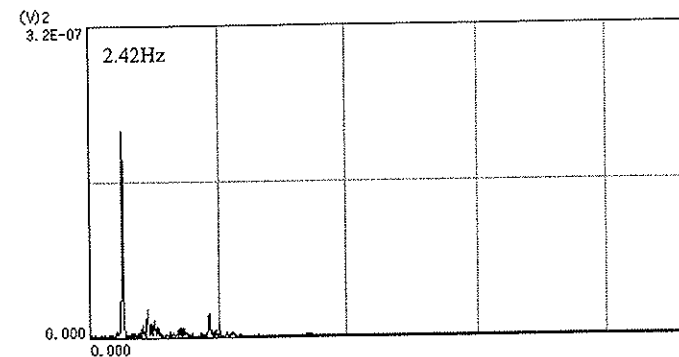


図. 2-3-22 パワースペクトルの例

2-3-3. 破断検知線による疲労き裂発生モニタリング

a) 原理

鋼構造物の疲労亀裂は、一般に目視検査で見逃されることが多い。しかし、目視検査では見逃し・手遅れの危険性が回避できないので、これを補完する維持管理手法が求められる。破断検知線は、疲労亀裂を早期かつ確実に安価に発見できるセンサーである。(図. 2-3-23 参照)

破断検知線は、図. 2-3-24 に示すように、2本の平行銅線を特殊フィルムでサンドイッチしたプレファブ構造で、幅 7mm 厚み 0.1mm であり、図. 2-3-25 に示すように、これを疲労亀裂の発生が予想される個所に予め接着により敷設して使用する。

特徴は、①早期に微小なき裂を検出できる高い疲労亀裂検出能力を持つ。②鋼材・塗装面への良好な接着性や、折り返し貼付けが可能、作業時に多少手荒く扱っても切れない強度を持つ等により施工性がよい。③検知線自体が長期の耐候性を有することである^{2-8), 2-9)}。

破断検知線の検知メカニズムは、鋼材にクラックが発生すると、鋼材と破断検知線を接着する樹脂にクラックが発生し、それと同時に破断検知線に局部ひずみが発生して破断するものである。

疲労試験等で、以下の性能を確認・検証し、各種製品に対して実証試験・適用が進められている^{2-8), 2-9)}。

- ① 破断検知時の亀裂開口振幅が約 5~10 μm であり、十分な亀裂検知性能を有する。
- ② 耐候性促進試験 (3000 時間; 屋外暴露約 10 年相当) 後の疲労試験でも検知性能を有する。
- ③ 耐剥離性評価試験 (熱応力-10~60℃のヒートサイクル試験) を行い、剥離の可能性が極めて低い。
- ④ 健全な塗装面への接着でも十分な亀裂検知性能を有する。
- ⑤ モード II, III の変形様式においても検知性能を有している。(モード I よりも検知性能が劣る)

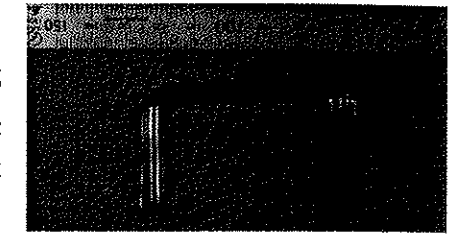


図. 2-3-23 破断検知線

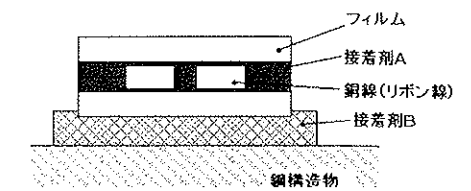


図. 2-3-24 破断検知線の構造

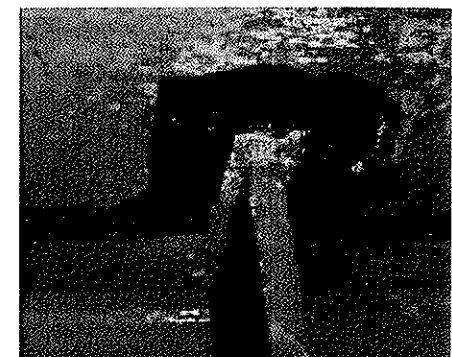


図. 2-3-25 破断検知線の設置例

b) 適用例

適用例の1つとして、新幹線橋梁に試験施工された「溶接部ヘルスマニタリングシステム」がある。疲労損傷が想定される箇所に破断検知線を貼付け、ループ回路を構成する。検知線に微小な電流を導通することで、亀裂発生（＝銅線破断）をモニタリングする。

疲労亀裂により破断検知線が断線すると、メール等で管理者に通報するシステムである。疲労亀裂の発生位置はTDR (Time Domain Reflect meter) 法で特定することができる²⁻⁸⁾。なお、腐食や結線部による断線と疲労によって生じる断線とは電氣的に区別している。

(図. 2-3-26 参照)

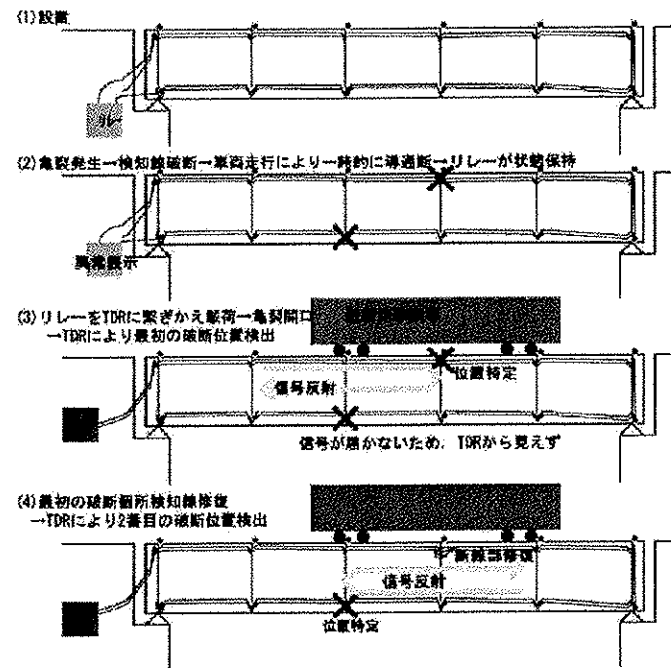


図. 2-3-26 溶接部ヘルスマニタリングシステム

c) 破断検知線の克服すべき課題

センサー自体は非常に安価で信頼性があるが、普及のためには点検管理者が望むシステムの開発および施工コストの更なる低減が課題である。

【参考文献】

- 2-1) 東日本高速道路：高速自動車国道北海道縦貫自動車道函館名寄線等（他 1 路線）に関する維持、修繕その他の管理の報告書（平成 17 営業年度）
- 2-2) 中日本高速道路：高速自動車国道中央自動車道富士吉田線等（他 4 路線）に関する維持、修繕その他の管理の報告書（2005 営業年度）
- 2-3) 西日本高速道路：高速自動車国道中央自動車道西宮線等（他 5 路線）に関する維持、修繕その他の管理の報告書（平成 17 営業年度）
- 2-4) 首都高速道路：都道首都高速 1 号線等に関する維持、修繕その他の管理の報告書（平成 17 営業年度）
- 2-5) 阪神高速道路：大阪府道高速池田線等に関する維持、修繕その他の管理の報告書（平成 17 営業年度）
- 2-6) 本州四国連絡高速道路：本州四国連絡高速道路一般国道 28 号等に関する維持、修繕その他の管理の報告書（平成 17 営業年度）
- 2-7) 構造工学委員会橋梁振動モニタリング研究小委員会：構造工学シリーズ 10 橋梁振動モニタリングのガイドライン，2000.
- 2-8) 伊藤 裕一，松尾 昌武，蔣 立志：破断検知線による鋼構造物疲労損傷モニタリング手法の開発：土木学会年次学術講演会講演集第 1 部 Vol.60,I-052，2005
- 2-9) 吉嶺 建史，伊藤 裕一，松尾 昌武，蔣 立志：破断検知線を用いた疲労損傷モニタリング手法における破断検知線の開発：土木学会年次学術講演会講演集第 1 部 Vol.60, I-053，2005